

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Радіотехнічний факультет

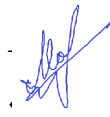
Кафедра прикладної радіоелектроніки

«На правах рукопису»

УДК _____

До захисту допущено:

В.о. зав. кафедри

 Андрій МОВЧАНЮК
 _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра за освітньо-професійною програмою
«Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
на тему: «Фільтрація кондуктивних завад в імпульсних джерелах
електроживлення»

Виконав :

студент 2 курсу, групи РЕ-31мп

Омелич Михайло Федорович _____

(Прізвище ім'я по батькові)

Керівник_ **Ст. викладач Новосад Андрій Анатолійович**

(Посада, науковий ступінь, вчене звання)

Рецензент **к.т.н. доц. каф. РІ Літвінцев Сергій Миколайович** _____

(Посада, науковий ступінь, вчене звання)

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

Студент Омелич М.Ф.

Київ – 2024 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра прикладної радіоелектроніки

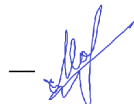
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 Електронні комунікації та радіотехніка

Освітньо-професійна програма «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.зав. кафедри



Андрій МОВЧАНЮК

«» 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студента

Омелич Михайло Федорович

(Прізвище ім'я по батькові)

1. Тема дисертації «Фільтрація кондуктивних завад в імпульсних джерелах електроживлення»

науковий керівник дисертації **Ст. Викладач Новосад Андрій
Анатолійович** затверджені наказом по університету від «08» листопада
2024 р. № 5024-с

2. Термін подання студентом дисертації 09 грудня 2024 року

3. Об'єкт дослідження Фільтр кондуктивних завад

4. Вихідні дані

ДСТУ 3593-97 Сумісність технічних засобів електромагнітна. Джерела електроживлення. Методи випробувань на кондуктивні радіозавади

ДСТУ 3639-97 Сумісність технічних засобів електромагнітна. Фільтри протизавадні. Загальні технічні умови

ДСТУ CISPR 22:2007 Обладнання інформаційних технологій.
Характеристики радіозавад. Норми та методи вимірювання.

ДСТУ EN 61204-3:2007 Джерела електроживлення низьконапружні з вихідною напругою постійного струму. Частина 3. Електромагнітна сумісність (EN 61204-3:2000, IDT)

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

- Дослідити вплив паразитних параметрів мережі на рівень кондуктивних завад для різних типів імпульсних стабілізаторів.
- Дослідити залежність завадо емісії від робочої частоти стабілізатора.
- Запропонувати покращену конструкцію фільтра завад та методику його розрахунку

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

7. Орієнтовний перелік публікацій

9. Дата видачі завдання 05 вересня 2023 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання теми магістерської дисертації	05.09.2023	
2	Розробка плану магістерської дисертації	10.11.2023	
3	Початок збору інформації для дослідження	15.11.2023р.	
	Підбір джерел. Аналітичний огляд	7.02.2024р.	
	Розроблення технічного завдання	15.03.2024р.	
	Моделювання, аналіз отриманих результатів	7.05.2024р.	
	Представлення магістерської дисертації	21.08.2024р.	
	Оформлення магістерської дисертації	25.10.2024р.	

Студент



Омелич Михайло Федорович

Науковий керівник



Ст. викладач Новосад Андрій Анатолійович

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 76 стор., 44 рис., 8 табл., 20 джерел.

Об'єкт дослідження – імпульсні джерела електроживлення та вхідні фільтри для зниження рівня кондуктивних завад.

Предмет дослідження – процеси фільтрації кондуктивних завад у імпульсних джерелах електроживлення.

Мета роботи – аналіз процесів фільтрації кондуктивних завад у різних типах імпульсних джерел електроживлення, виявлення ключових факторів, що впливають на ці процеси, та розробка рекомендацій щодо вдосконалення конструкції фільтрів.

Методи дослідження – використання комп'ютерного моделювання, методів теорії електричних кіл та математичної статистики.

Новизна роботи. Виявлено залежності рівня завадоемісії від паразитних характеристик електромережі, робочої частоти імпульсних джерел електроживлення (ІДЕ) та параметрів індуктивного дроселя. Розроблено нову конструкцію здвоєного гібридного дроселя та методику його розрахунку.

Ключові слова. Електромагнітна сумісність, імпульсний стабілізатор, фільтр завад, здвоєний дросель.

SUMMARY

Master's Thesis: 81 pages, 44 figures, 8 tables, 20 references.

Object of Study – pulse power supplies and input filters for reducing conductive interference.

Subject of Study – processes of filtering conductive interference in pulse power supplies.

Purpose of the Study – analysis of conductive interference filtering processes in various types of pulse power supplies, identification of key factors affecting these processes, and development of recommendations for improving filter design.

Research Methods – computer modeling, methods of circuit theory, and mathematical statistics.

Novelty of the Work

Dependences of conducted emissions on parasitic parameters of the power grid, operating frequency of pulse power supplies (PPS), and parameters of the filter's inductive choke have been identified. A new design of a dual hybrid choke and a method for its calculation have been proposed.

Keywords

Electromagnetic compatibility, pulse stabilizer, interference filter, dual choke.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Аналіз сучасного стану проблеми.....	9
1.1 Електромагнітна сумісність імпульсних джерел електроживлення. Основні поняття .	9
1.2 Причини завад в імпульсних джерелах живлення	11
1.3 Стандартизація в області електромагнітної сумісності імпульсних джерел електроживлення.....	13
1.4 Методика вимірювання кондуктивних завад.....	16
1.5 Основні шляхи забезпечення електромагнітної сумісності імпульсних джерел живлення	20
1.6 Висновки та задачі дослідження.....	24
2 Моделювання основних типів імпульсних джерел електроенергії ...	25
2.1 Класифікація імпульсних джерел електроенергії.....	25
2.2 Імпульсні стабілізатори джерел електроенергії	25
2.2.1 Понижувальний стабілізатор.....	25
2.2.2 Підвищувальний стабілізатор.	27
2.2.3 Інвертуючий (полярно-реверсуючий) стабілізатор.....	28
2.3 Фільтри завад.....	28
2.4 Моделювання основних типів стабілізаторів.	30
2.4.1 Характеристика програмного середовища Matlab Simulink.	30
2.4.2 Методика створення моделей. Результати моделювання.....	33
2.5 Висновки	41
3 Пошук шляхів підвищення електромагнітної сумісності імпульсних джерел електроенергії.....	42
3.1 Дослідження залежності завадоємисії імпульсних джерел електроенергії від паразитних параметрів електромережі.....	42
3.2 Дослідження залежності завадоємисії імпульсних джерел електроенергії від робочої частоти.....	46
3.3 Дослідження залежності завадоємисії від параметрів фільтра завад	49
3.3.1 Залежність диференційної складової завади від параметрів фільтра.....	49
3.3.2 Залежність завадоємисії від параметрів фільтра на прикладі ІДЕ з підвищувальним стабілізатором	51
3.4 Проектування фільтра завад.....	56
3.4.1 Конструкція гібридного дроселя.....	56
3.4.2 Методика проектування фільтра завад на основі гібридного здвоєного дроселя.....	58

	7
3. 6 Висновки	67
Висновок	68
Перелік посилань	69
Додаток А.....	71
Додаток Б	74

ВСТУП

Проблема електромагнітної сумісності (ЕМС) набуває все більшої актуальності, охоплюючи нові аспекти радіотехніки. Це зумовлено активним впровадженням комп'ютерних систем у різні сфери діяльності, розширенням частотного спектра завдяки появі сучасних систем зв'язку, а також підвищенням швидкодії інформаційно-обробних систем. Додатково, вимоги до стійкості електронного обладнання перед впливом електромагнітного випромінювання (ЕМВ) стають дедалі суворішими.

З розвитком системи міжнародної стандартизації та зростанням потреби сертифікації продукції на відповідність нормам ЕМС, очевидно, що характеристики ЕМС ставатимуть одним із ключових факторів конкурентоспроможності виробів на ринку електроніки. У сучасних умовах конкуренції технічні рішення повинні бути ретельно перевірені та обґрунтовані, особливо щодо параметрів завадозахищеності та ЕМС, оскільки ці аспекти є предметом обов'язкової сертифікації перед запуском продукції на ринок.

Для забезпечення роботи радіоелектронних пристроїв необхідні джерела електроживлення. На сьогодні імпульсні джерела електроживлення (ІДЕ) займають понад 90% світового ринку. Їхні показники постійно покращуються, однак паралельно підвищуються і вимоги до їхньої якості. Наприклад, найкращі зразки ІДЕ досягають коефіцієнта корисної дії (ККД) 94% при 50% навантаженні.

У той же час стандарти з ЕМС постійно уточнюються та змінюються, спрямовуючи зусилля на підвищення жорсткості нормативів. У зв'язку з цим виникає потреба у розробці ефективних підходів до покращення ЕМС ІДЕ, які дозволили б виконувати сучасні вимоги без додаткових витрат ресурсів.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1 Електромагнітна сумісність імпульсних джерел електроживлення. Основні поняття

Інтенсивний розвиток нових видів РЕЗ на основі широкого застосування інтегральних схем, мікропроцесорів привело до вимог мініатюризації джерел вторинного електроживлення, підвищення питомої потужності, надійності, ККД, якості вихідної напруги, розширення функціональних можливостей і т.д. Одночасне задоволення зазначених вимог, що носять суперечливий характер, стало можливим завдяки впровадженню імпульсних джерел вторинного електроживлення, що поступово витісняють лінійні джерела живлення.

Імпульсні джерела електроживлення (ІДЕ), при незаперечних перевагах у ККД, масогабаритних показниках і т.д., генерують значно більш високі рівні завад.

Під *електромагнітною завадою* (ЕМЗ) розуміють електромагнітний, електричний і (або) магнітний процес, створений будь-яким джерелом у просторі та (або) провідному середовищі, який небажано впливає або може впливати на корисний сигнал при його передачі, прийманні та (або) перетворенні до заданого виду. [1]

Випромінювана ЕМЗ — це завада, що поширюється в навколишньому просторі. Її опису й заходам придушення буде приділено менше уваги, оскільки, порівняно нескладні заходи конструктивного характеру дозволяють зменшити її рівень до припустимих норм.

Кондуктивна ЕМЗ — завада, що поширюється в провідному середовищі (по проводах, провідним поверхням, тобто завада, передана контактним способом). Високочастотні кондуктивні завади можуть бути по

характеру процесів віднесені або до безперервних коливань, або до аперіодичних і коливальних перехідних процесів.

Залежно від походження і характеру поширення кондуктивні завади прийнято розділяти на наступні види:

- симетричні (диференційні — differential mode);
- несиметричні (синфазні або загального виду — common mode).

Симетрична завада виникає, коли напруга завади прикладена між фазним (лінійним) і нейтральним проводами, тобто це завада, що поширюється аналогічно протіканню змінного струму в мережі. У колах постійного струму напруга симетричної завади прикладена між позитивним і негативним провідниками.

Несиметрична завада — це завада, що діє між провідниками і корпусом або шиною заземлення через паразитний імпеданс (паразитні ємності) між цими об'єктами. У колах постійного струму напруга несиметричної завади прикладена між провідниками (позитивним, негативним) і корпусом. У МЭК 50-161-90 даються більш строгі визначення видів завад. Зокрема, симетрична напруга — напруга між двома будь-якими провідниками із заданої групи активних провідників. Несиметрична напруга — напруга між провідником і регламентованим еталоном, звичайно «землею» або пластиною заземлення.

Сукупність реальних електромагнітних явищ, що існують у даному місці, у частотному й часовому діапазонах називається *електромагнітною обстановкою (ЕМО)*.

Здатність імпульсного джерела живлення, як технічного засобу, ефективно функціонувати із заданою якістю в певній ЕМО, не створюючи при цьому неприпустимих електромагнітних завад іншим технічним засобам і живильної електромережі називається *електромагнітною сумісністю (ЕМС) (Electromagnetic Compatibility — EMC)*

Основним державним стандартом в області термінології електромагнітної сумісності технічних засобів є ДСТУ ІЕС 61000-1-1:2009, ДСТУ ІЕС 60050-161-2003, ДСТУ 2977-95. Міжнародна термінологія електромагнітної сумісності представлена в стандарті МЕК-50-161-90. Основні терміни і поняття стосовно до імпульсних джерел живлення викладені на підставі даних стандартів.

Електромагнітна емісія від імпульсного джерела живлення, завадоемісія — генерування імпульсним джерелом живлення електромагнітної енергії, яка випромінюється в простір у вигляді електромагнітних хвиль.

Рівень електромагнітної емісії від джерела завади (імпульсного джерела живлення), *рівень завадоемісії* — рівень завади конкретного виду, яка генерується імпульсним джерелом живлення. Цей рівень виміряється в регламентованих умовах.

Стійкість до ЕМЗ, завадостійкість — здатність імпульсного джерела живлення зберігати задану якість функціонування при впливі внутрішніх (у самому джерелі) і зовнішніх (з боку електричної мережі) завад.

Рівень стійкості до ЕМЗ, рівень завадостійкості імпульсного джерела живлення — максимальний рівень завади конкретного виду, що впливає на імпульсне джерело живлення, при якому імпульсне джерело живлення зберігає задану якість функціонування.

1.2 Причини завад в імпульсних джерелах живлення

Утворення завад у джерелах живлення пов'язане з нелінійними процесами перетворення струму і напруги в їхніх функціональних вузлах, а створюваний ними рівень завад залежить від наступних основних факторів:

- форми і параметрів комутованої напруги або струму, включаючи амплітуду, частоту комутації і т.д.;
- частотних властивостей використовуваних активних і пасивних електрорадіоелементів;
- прийнятого методу компоновання та монтажу.

Таким чином, кожний з функціональних вузлів джерела живлення, у якому відбувається імпульсне перетворення енергії, є потенційним джерелом завад.

Завади від імпульсних джерел живлення можуть впливати кондуктивно та електромагнітним шляхом (випромінювані завади) на функціональні вузли власної і поруч розташованої апаратури. При цьому перенесення завад на сусідні РЕЗ через загальний імпеданс мережі живлення є одним з основних.

На рисунку 1 представлена спрощена еквівалентна схема шляхів поширення кондуктивних завад у системі «мережа електроживлення - імпульсні джерела живлення — навантаження»

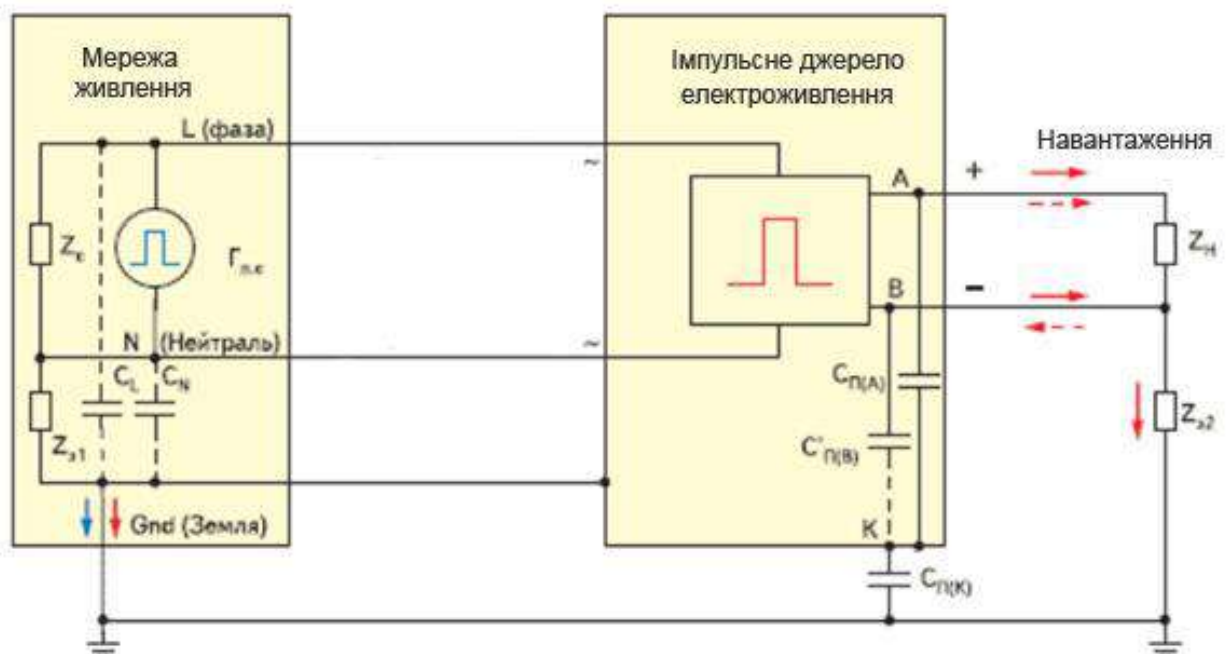


Рисунок 1.1 – Шляхи поширення кондуктивних завад

На схемі суцільними лініями показані шляхи поширення несиметричних завад, а пунктирними — симетричних завад.

Γ_3 — джерело завад з боку мережі електроживлення,

$\Gamma_{\text{пиз}}$ — імпульсне джерело живлення як джерело (генератор) завад,

Z_M, Z_N — імпеданс мережі й навантаження відповідно;

Z_{31}, Z_{32} - імпеданс провідників заземлення нейтралі та одного (наприклад, негативного) полюса навантаження;

$C_L, C_N, C_{\text{п(А)}}, C_{\text{п(В)}}, C_{\text{п(К)}}$ — паразитні ємності вихідних полюсів (затискачів) джерела щодо корпусу і корпусу відносно «землі».

Несиметричні завади замикаються на «землю» через струмонесучі кола і відповідні паразитні ємності (імпеданс). Значення (амплітуда) струмів несиметричних завад залежить як від амплітуди сигналів завад, так і від імпедансу паразитних зв'язків із шиною заземлення.

1.3 Стандартизація в області електромагнітної сумісності імпульсних джерел електроживлення

Стандарти на випромінювання електромагнітних завад враховують два види випромінювань [7]:

- кондуктивні завади на входах електроживлення;
- напруженість електричного поля завад при їхнім випромінюванні в ефір.

Існує два набори обмежень на рівні завад для певного виду обладнання: обладнання класу А (Class A), яке може використовуватися тільки в промисловій або в інших спеціально підготовлених зонах; обладнання класу В (Class B), яке може використовуватися тільки в житлових приміщеннях, офісах, телекомунікаційному обладнанні.

Найбільш важливі міжнародні стандарти в цій області:

- EN55022 (CISPR22)— європейський стандарт для обладнання інформаційних технологій; ДСТУ CISPR 22:2007 Обладнання інформаційних технологій. Характеристики радіозавад. Норми та методи вимірювання
- FCC (розділ 15, підрозділ J) — американський стандарт для обладнання інформаційних технологій;
- VDE0871 — німецький стандарт для обладнання інформаційних технологій.

Рівні А и В німецького стандарту VDE0871 довгий час залишалися найсуворішими для контролю рівня кондуктивних завад у мережі електроживлення — зокрема, жорсткішими, ніж в стандарті CISPR22 на низьких частотах. Для виконання директиви ЄС у Німеччині був прийнятий національний стандарт VDE0878 (частина 30), що є, по суті, еквівалентом стандарту EN55022.

На рисунку 1.2 зображені припустимі норми кондуктивних завад на затискачах мережного електроживлення для класів А и В у частотному діапазоні від 10 КГц до 30 МГц, прийняті стандартами EN55022, VDE0871 і FCC.

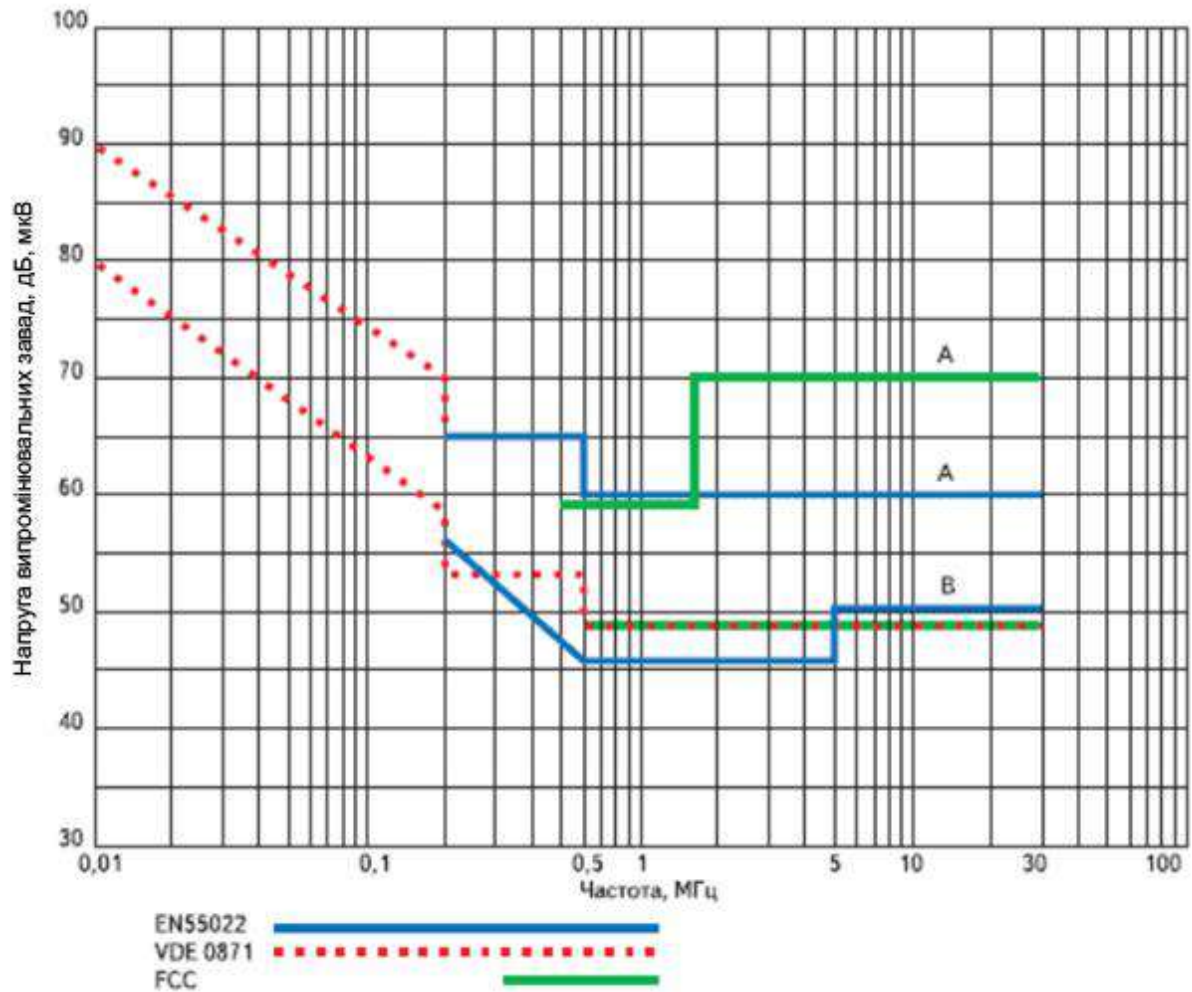


Рисунок 1.2 – Припустимі норми кондуктивних завад на затискачах мережного електроживлення для класів А і В у стандартах EN55022, VDE0871 і FCC

З рисунку 1.2 видно, що VDE0871 обмежує рівні кондуктивних завад у мережу електроживлення в діапазоні частот від 10 до 150 кГц. Цей діапазон частот важливий навіть для сучасних імпульсних джерел живлення, що працюють на частотах перетворення більше 100 кГц. Стандарт EN55022 не пред'являє вимог до області частот нижче 150 кГц. Разом з тим, обмеження в класі В у EN55022 вище (рівень завад обмежений на нижчому рівні). У діапазоні частот від 150 кГц до 30 МГц для обладнання класу А норми завад у стандартах EN55022 і VDE0871 збігаються. Стандарт FCC позиціонується в частотному діапазоні від 450 кГц до 30 МГц і для класів А і В його норми нижче, ніж в EN55022.

Розглянемо норми на випромінювання ЕМЗ у простір. Порівняння норм по стандартах EN55022, VDE0871, FCC зробити складніше, оскільки ці норми приводяться для різних відстаней точки вимірювання від об'єкта. На рис. 1.2 дані припустимі норми випромінюваних завад у простір для класів А и В по стандартах EN55022 і VDE0871. По стандартах EN55022 і VDE0871 відмінність у нормах між класами А и В у діапазоні частот нижче 30 МГц відсутні взагалі. Різниця лише у відстанях вимірювання — 30 і 10 м відповідно; в VDE0871 — 100 і 30 м відповідно.

Основним стандартом, у якому нормований рівень завад для імпульсних джерел живлення, є ГОСТ51527-99 (МЭК 60478-3-89) «Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стабілізовані джерела постійного струму. Кондуктивні електромагнітні завади. Норми і методи випробувань».

По стандарту VDE0871 для частот вище 30 МГц припустимі норми завад для класу В у середньому вище, але в класі А є норми в інших частотних діапазонах.

Для імпульсних джерел живлення невеликої та середньої потужності (до 300 Вт, струми — не більш 10 А) у складі апаратури, як правило, проблема дотримання припустимих норм по випромінюваних завадах вирішується. При цьому достатньо, щоб джерело було розміщено в металевому корпусі, а апаратура мала свій металевий (металізований) корпус.

1.4 Методика вимірювання кондуктивних завад

Методика вимірювання синфазної завади в певній смузі частот згідно [4] зводиться, по суті, до вимірювання падіння напруги на входних затискачах ІДЕ відносно корпусу на тестових навантажуючих резисторах номіналом 50 Ом (рис. 1.3). При цьому за постійною напругою вимірювальне

коло відв'язане від кіл живлення конденсатором (0.25 мкФ для рівнів споживаного струму до 25 А або 0.1 мкФ для рівня понад 25 А), а вплив імпедансу кола живлення на вимірювані характеристики в досліджуваній області частот, виключається за допомогою так званого еквівалента мережі.

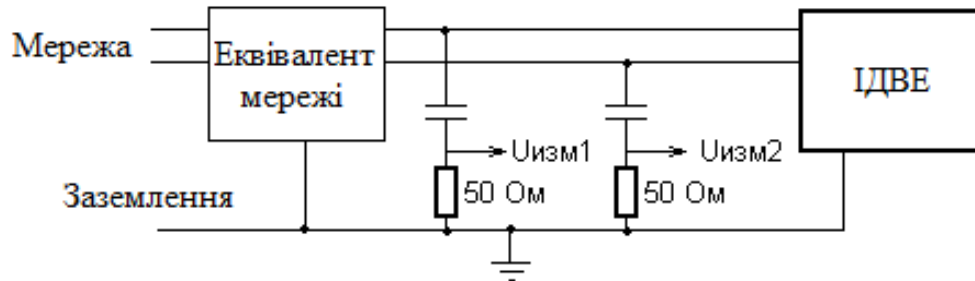


Рисунок 1.3 – Схема вимірювання синфазної завади

Еквівалент мережі виконує наступні функції:

- забезпечення стандартного опору мережі 50 Ом;
- підключення вимірювального приймача до досліджуваної мережі, що перебуває під напругою;
- забезпечення достатнього загасання завад, що поширюються від інших джерел на випробуване обладнання і не підлягають вимірюванню;
- забезпечення загасання завад, що поширюються від випробуваного обладнання в загальну мережу електроживлення.

Результат вимірювання залежить від опору мережі. Наприклад, у мережі з високим опором те ж джерело створить більшу напругу завад. Стандартизація опору мережі дає однозначність вимірювань і дозволяє порівнювати результат вимірювань з нормами. У реальній мережі, залежно від її опору, ІДЕ може створювати як більший, так і менший рівень завад в порівнянні зі значеннями, отриманими при стандартних умовах.

Приклади схемної реалізації еквівалента мережі показано на рисунках 1.4, 1.5. Напруга живлення подається на вивід 1, випробуване обладнання підключається до виводу 2. Вимірювач підключається до виводу 3 одного з вимірювальних кіл. Вивід 3 іншого кола повинен бути підключений до корпусу через навантаження 50 Ом. Вхідний опір вимірювача й опір

навантаження разом з іншими елементами еквівалента забезпечують стандартний опір мережі. Вимірювання проводяться для кожного провідника електроживлення. При цьому фактично вимірюють напругу завади в діапазоні частот 0,009-30 МГц між кожним проведенням живлення і землею.

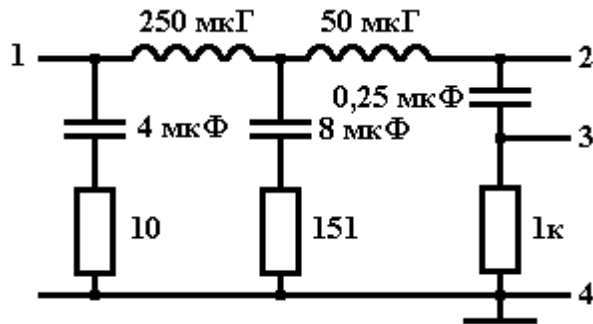


Рисунок 1.4 – Приклад схеми однієї фази двохпровідного еквівалента мережі.

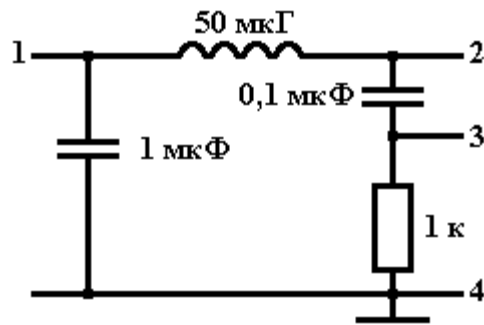


Рисунок 1.5 – Приклад схеми однопровідного еквівалента мережі.

Режим роботи випробуваного обладнання ІДЕ при випробуваннях повинен задовольняти наступним умовам.

Необхідно забезпечити стандартні умови навантаження ІДЕ, як це визначене в технічних вимогах на виріб або як це зазначене в інструкціях виробника. Час роботи ІДЕ повинен відповідати вимогам документації. Час прогону ІДЕ перед випробуваннями повинне бути достатнім для того, щоб гарантувати, що режим роботи ІДЕ буде типовим.

Джерело живлення повинно мати номінальне значення напруги. У випадку, якщо рівень завад міняється при зміні напруги живлення, слід установлювати значення напруги від 0,9 до 1,1 від номінального значення. Якщо можливе використання декількох значень номінальної напруги, то

використовується значення, при якому рівень завад максимальний. Режим роботи ІДЕ повинен бути максимально наближеним до реальних практичних умов.

Сполучний кабель між вимірювальним приймачем і обладнанням повинен бути екранованим, а його хвильовий опір повинен бути узгоджений із вхідним опором приймача. Необхідно уникати утворення контурів із замиканням через заземлення.

Еквівалент мережі повинен підключатися до заземлення через провідники мінімальної довжини.

Вимірювання напруги повинне проводитися відносно еталонного заземлення.

Вимірювання завад повинні відповідати наступним умовам :

а) відтворюваність, тобто результати не повинні залежати від місця проведення вимірювань;

б) відсутність взаємних впливів, тобто приєднання ІДЕ до вимірювального обладнання не повинне впливати ні на функціонування ІДЕ, ні на точність вимірювань;

в) наявність достатнього відношення сигнал/шум;

г) забезпечення навантажень і робочих умов ІДЕ.

Випробування на електромагнітну сумісність, у тому числі кондуктивних завад, проводяться на сертифікованому обладнанні і вимагають певних фінансових витрат. Тому, ще на етапі розробки ІДЕ, необхідно враховувати основні фактори, що впливають на результати подібних випробувань.

1.5 Основні шляхи забезпечення електромагнітної сумісності імпульсних джерел живлення

Імпульсне джерело живлення, як і будь-яка технічна система, повинно мати необхідний рівень завадостійкості. З іншого боку, імпульсне джерело живлення є джерелом (генератором) електромагнітних завад в широкому діапазоні частот і тому повинно мати рівень завадоємисії, відповідний до прийнятих норм. При цьому слід враховувати, що саме імпульсне джерело живлення складається з функціональних вузлів і модулів різного призначення, що працюють у різних частотних діапазонах, з різними енергетичним рівнями, вимогами до чутливості, точності, найчастіше із зовнішнім інтерфейсом. Таким чином, проблеми забезпечення електромагнітної сумісності імпульсних джерел живлення необхідно вирішувати конкретно в трьох основних напрямках:

1. Заходи щодо придушення (ослаблення) електромагнітних аномалій і завад з боку мережі електроживлення (входу).
2. Заходи щодо ослаблення власних (внутрішньоб'єктових) завад.
3. Заходи щодо придушення (ослаблення) кондуктивних завад на виході і на вході імпульсних джерел живлення.

У таблиці 1.1 розглянуті основні проблеми в області електромагнітної сумісності імпульсних джерел живлення і наведені в узагальненому виді заходів щодо забезпечення електромагнітної сумісності. Пропоновані заходи і рекомендації дані на основі робіт [9, 10, 14, 15] .

Таблиця 1.1. Заходи щодо забезпечення ЕМС в ІДЕ

Види завад	Заходи щодо забезпечення ЕМС
1. Електромагнітні впливи з боку мережі електроживлення	
1.1. Провали напруги	
а) Повільні зниження напруги	Застосування схеми ІДЕ з універсальним входом Типовий діапазон напруги мережі для АС/DC-перетворювача з універсальним входом 65(90)..265 В 47-63 Гц, Застосування схеми ІДЕ з коректором коефіцієнта потужності (ККП/PFC)
б) Швидкі зниження напруги	Оптимальне значення величини ємності конденсатора мережного випрямляча або вихідного конденсатора в ККП Стандартний час утримання вихідної напруги при провалі напруги мережі - 20 мс (1 період напруги мережі)
1.2. Викиди напруги (перенапруга)	Те ж. Рациональний вибір параметрів імпульсного керування (ШІМ ЧІМ), включаючи введення керуючого сигналу по зміні вхідної напруги.
1.3. Вищі гармонійні складові вхідного струму	Застосування схем ІДЕ з ККП/PFC: а) пасивний ККП (НЧ-дросель - для малопотужних АС/DC-перетворювачів;) б) активний ККП - для АС/DC-перетворювачів підвищеної та великої потужності
1.4.Кондуктивні завади	
а) Імпульсні завади	Застосування варисторів на вході мережного завадоподавляючого фільтра (ЗПФ)
б) Низькочастотні завади	Застосування коректора потужності ККП
в) Високочастотні завади й радіозавади	Застосування високоефективного мережного ЗПФ і раціональний вибір його компонентів (особлива увага придушенню несиметричних завад)
1.5.Завади випромінювання	Екранований корпус; правильне заземлення; Мінімізація площі контурів з підвищеним індуктивним опором

Продовження таблиці 1.2

Види завад	Заходи щодо забезпечення ЕМС
2. Власні завади ІДЕ (внутрішньоблокові завади)	
2.1 Кондуктивні завади	• Застосування в ККП і перетворювачі напруги (інверторі) високоякісних компонентів з карбіду кремнію: - обмежувачі швидкості наростання напруги - швидкодіючих рекуперативних діодів: fast (ultrafast) FRED і діодів Шоткі з карбіду кремнію;
2.2.Завади випромінювання	• Оптимізація площі й поперечного перерізу силових контурів з великими струмами; - зменшення індуктивності розсіювання трансформатора; - мінімізація паразитної ємності між первинною й вторинною силовою обмоткою трансформатора (застосування спеціальних екранних обмоток). Екранування силових індуктивних компонентів (трансформаторів, дроселів), особливо із зазором
3. Кондуктивні завади на виході	
3.1 Імпульсні завади	• Використання квазірезонансного методу перетворення; • Використання у вихідному ВЧ випрямлячі: - діодів Шоткі або надшвидкодіючих діодів; - обмежувачів швидкості наростання напруги RC кіл; - (демпферів) для шунтування силових діодів. • Використання ВЧ дроселів з малою паразитною ємністю; • Шунтування електролітичних конденсаторів керамічними конденсаторами; • Використання на виході прохідних конденсаторів; • Оптимальне компонування вузлів і компонентів ІДЕ (мінімізація взаємного впливу); • Раціональний електромонтаж: - оптимізація і рознесення контурів (силових і керування);

Продовження таблиці 1.2

Види завад	Заходи щодо забезпечення ЕМС
	- оптимальне розведення «земель».
3.2. Низькочастотні завади	Вибір підвищеної частоти перетворення й оптимального закону і регулювання (ШІМ або ЧІМ)
3.3. Високочастотні завади й радіозавади	
а) Завади на частоті перетворення	• Застосування високоефективного ЗПФ • Раціональний вибір компонентів ЗПФ: • - ВЧ дроселів з величиною індуктивності, що забезпечує його нерозривний струм; • - спеціальних конденсаторів з низьким імпедансом на високих частотах (з малим ESR), у тому числі трьох- і чотирьохвыводних.
б) Завади на суміжних частотах	Те ж. При різних частотах перетворення активного ККП і перетворювача

Для розв'язання завдання практичного забезпечення електромагнітної сумісності імпульсних джерел живлення по всіх необхідних нормах необхідно виконувати **весь комплекс заходів**. Накопичений досвід різних розробників і дослідників показує, що при нехтуванні окремими рекомендаціями, неприпустимий рівень завад може виявитися в непередбачених аспектах: деякі режими функціонування, діапазон частот, «інша» мережа електроживлення і т.д. У той же час раціональний підхід до проблеми забезпечення електромагнітної сумісності імпульсних джерел

живлення, використання позитивного досвіду дозволяють досягти істотних результатів навіть при розв'язку складних завдань по придушенню завад.

1.6 Висновки та задачі дослідження

Одним із ключових джерел завад в імпульсних джерелах електроживлення (ІДЕ) у широкому діапазоні частот є процеси, зумовлені самим принципом роботи ІДЕ з використанням ШІМ. Зокрема, це тактова частота перетворення та її гармоніки, які проявляються у вимірюваних сигналах. Ще одним важливим чинником є комутаційні процеси, що виникають у ключових елементах схеми.

Подолання кондуктивних завад в ІДЕ є складнішою задачею, ніж боротьба з радіозавадними явищами, які можна усунути за допомогою екранування. Тому в даній роботі особлива увага приділяється забезпеченню електромагнітної сумісності (ЕМС) ІДЕ з урахуванням кондуктивних завад. Рівень таких завад на виході ІДЕ залежить від типу радіоелектронного обладнання (РЕЗ), для якого використовується це джерело живлення. Допустимі значення вихідних завад можуть варіюватися залежно від специфіки апаратури і визначаються технічними вимогами та завданнями.

Натомість рівні кондуктивних завад на вході ІДЕ, які впливають на електромережу, суворо регламентовані міжнародними стандартами, що підкреслює актуальність цієї проблеми. У зв'язку з цим у роботі першочергово розглядаються питання, пов'язані з емісією завад у мережу живлення, впливом параметрів мережі на ці явища та способами зменшення рівня кондуктивних завад, що генеруються ІДЕ в електромережу. Основним заходом по боротьбі з кондуктивними завадами є фільтрація, тому в роботі необхідно, проаналізувавши методики розрахунку фільтрів, дослідити вплив параметрів фільтрів на рівень завадоемісії, дати рекомендації по їх проектуванню.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ОСНОВНИХ ТИПІВ ІМПУЛЬСНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

2.1 Класифікація імпульсних джерел електроенергії

В залежності від застосованого в джерелі живлення імпульсного стабілізатора розрізняють ІДЕ:

- З понижувальним стабілізатором
- З підвищувальним стабілізатором
- З інвертуючим (полярно-реверсуючим) стабілізатором

Понижувальний стабілізатор застосовується для широкого спектру потужностей в залеж від схеми з'єднання ключів.

Для малих і середніх потужностей найчастіше використовуються схеми на основі підвищувального стабілізатора у вигляді зворотногоходового перетворювача, через відносно високу стійкість до короткого замикання у колі навантаження.

В ІДЕ на основі інвертуючого стабілізатора, порівняно з попередніми, можливо отримати вихідну напругу менше чи більше вхідної. Використовується лише для малих і середніх потужностей внаслідок наявного перевантаження ключа.

2.2 Імпульсні стабілізатори джерел електроенергії

2.2.1 Понижувальний стабілізатор.

Типова схема імпульсного стабілізатора понижувального типу представлена на рисунку 2.1. На вхід регулюючого транзистора подається імпульсний сигнал від схеми керування. Зміна шпаруватості керуючих імпульсів відбувається автоматично таким чином, щоб вихідна напруга підтримувалася на заданому рівні із припустимою точністю. Дросель L і конденсатор C перетворюють однополярні імпульси змінної шпаруватості, що надходять із колектора регулюючого транзистора, у напругу постійного

струму. Діод VD, що забезпечує протікання струму в дроселі регулюючого транзистора, перебуває в закритому стані. Робота стабілізатора пояснюється часовими діаграмами (рисунок 2.2). У проміжки часу регулюючий транзистор відкритий ($t_0-t_1, t_2-t_3, t_4-t_5$), на вхід фільтра LC-типу прикладається напруга живлення. Діод VD при цьому закритий. Струм у дроселі в ці проміжки часу I_L зростає за лінійним законом, досягаючи свого максимального значення до моменту вимикання транзистора. У інші проміжки часу транзистор закритий енергія, накопичена в елементах фільтра, передається в навантаження. Струм дроселя I_L протікає через відкритий діод VD.

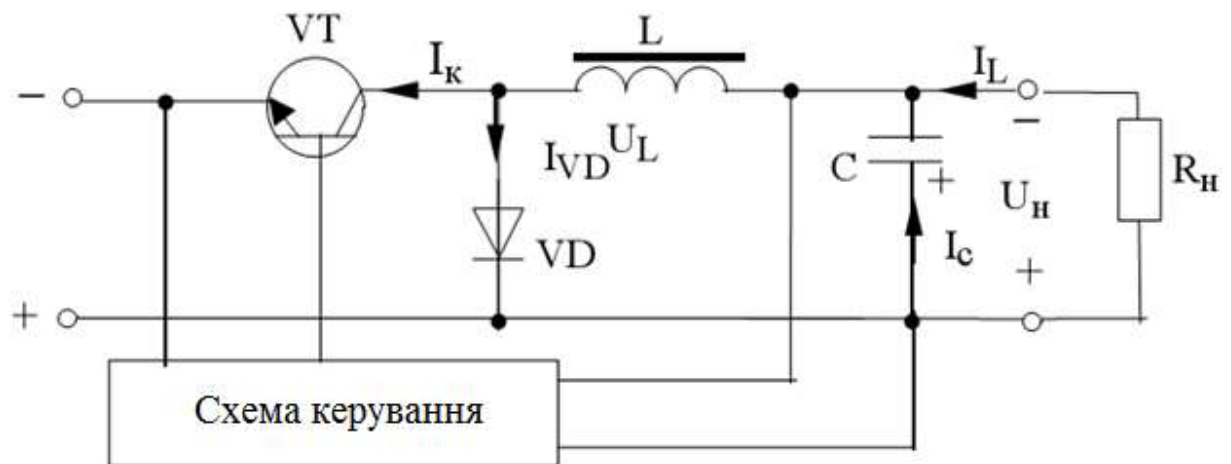


Рисунок 2.1 – Понижувальний стабілізатор

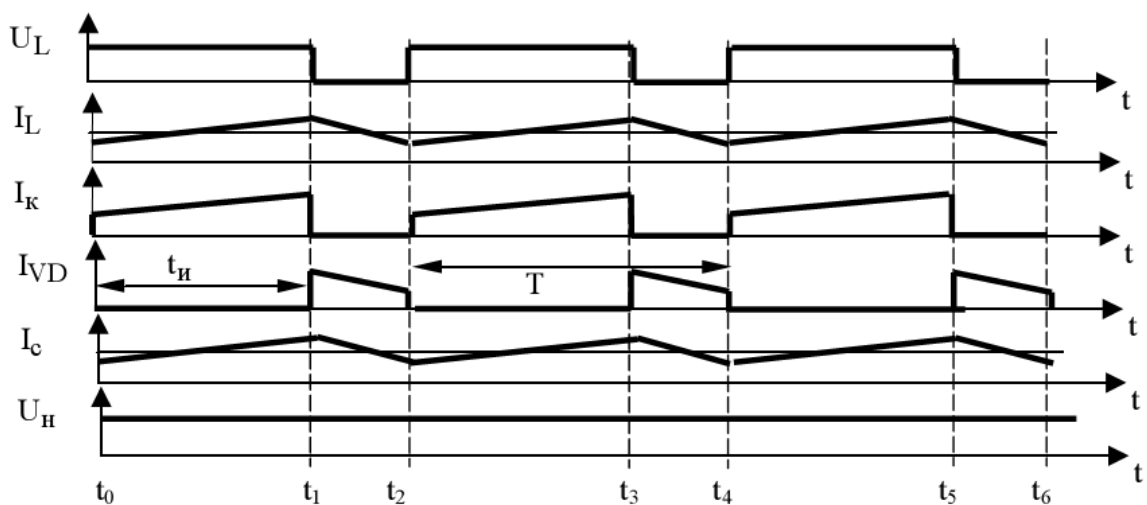


Рисунок 2.2 – Часові діаграми роботи понижувального стабілізатора.

Рівень пульсацій вихідної напруги багато в чому визначається індуктивністю дроселя і ємністю конденсатора фільтра. При зменшенні індуктивності дроселя фільтра в ньому збільшуються пульсації струму. При досить малій індуктивності L у схемі стабілізатора може настати режим переривчастого струму в дроселі фільтра, при якому погіршується навантажувальна характеристика стабілізатора.

2.2.2 Підвищувальний стабілізатор.

Схема імпульсного стабілізатора з регулюючим транзистором, підключеним паралельно навантаженню наведена на рисунку 2.3. У розглянутому стабілізаторі регулюючий транзистор відділений від навантаження діодом. При відкриванні транзистора через дросель протікає колекторний струм V_T , який збільшується за лінійним законом, досягаючи свого максимального значення до моменту закриття транзистора. Дросель при цьому запасає електромагнітну енергію, діод VD закритий (на його катоді позитивний потенціал). Після закриття регулюючого транзистора електромагнітна енергія, накопичена в дроселі на попередньому інтервалі часу, через діод, що відкрився, передається в навантаження і частково надходить на конденсатор. У порівнянні з раніше розглянутою схемою (рисунок 2.1), у підвищувальному стабілізаторі вихідна напруга може перевищувати вхідну.

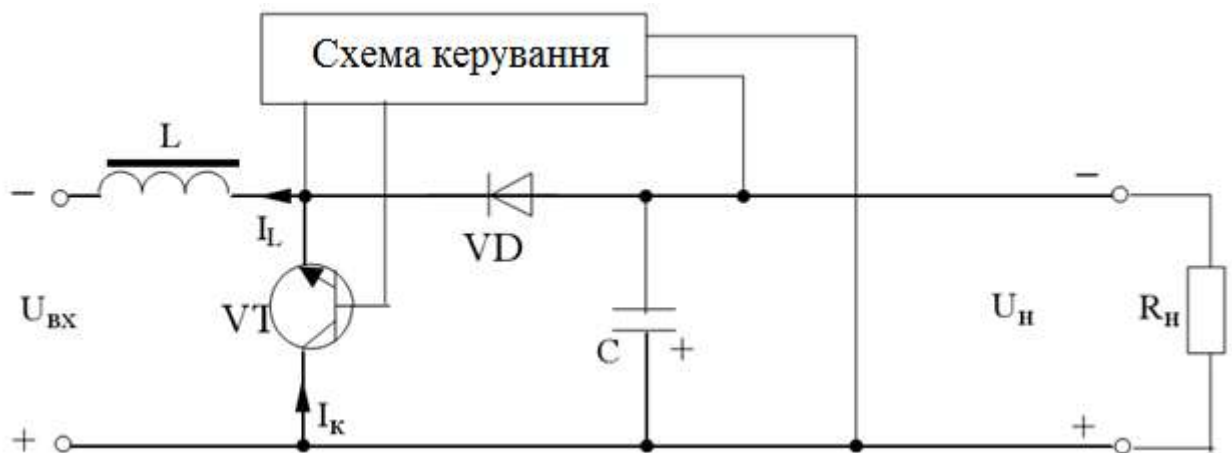


Рисунок 2.3 – Підвищувальний стабілізатор.

2.2.3 Інвертуючий (полярно-реверсуючий) стабілізатор.

На рисунку 2.4 представлена схема стабілізатора, який змінює полярність вхідної напруги. При відкритому стані регулюючого транзистора дросель накопичує електромагнітну енергію. Діод VD при цьому закритий, навантаження разом з конденсатором фільтра відключена від джерела живлення. Перемикання регулюючого транзистора в закритий стан супроводжується відкриванням діода VD і переходом енергії, накопиченої в дроселі, у конденсатор фільтра C і навантаження. Полярність вихідної напруги при цьому виявляється протилежною полярності вхідної напруги.

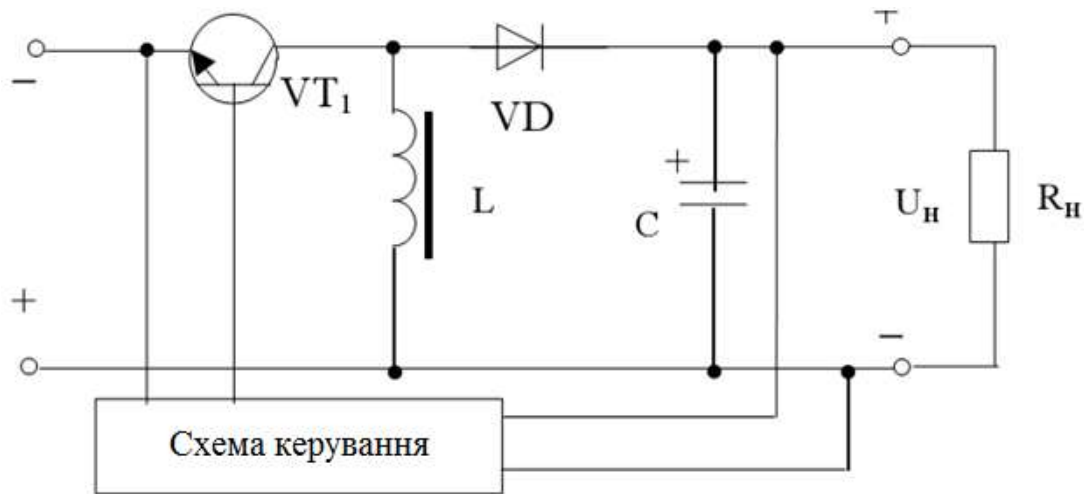


Рисунок 2.4 – Інвертуючий (полярно-реверсуючий) стабілізатор

2.3 Фільтри завад

Фільтри захисту від кондуктивних завад встановлюються у вхідному і вихідному колах ІДЕ. Такий фільтр повинен подавляти як диференційну, так і синфазну складові завади. Мережні фільтри у вхідному колі повинні послабляти коливання високої частоти і пропускати без ослаблення коливання низької (промислової) частоти. Тому їх реалізують на основі фільтрів нижніх частот (ФНЧ).

Найбільш поширена схема мережного фільтра показана на рисунку 2.5. Цю схему умовно можна розділити на фільтр несиметричних (синфазних)

завад, що включає в себе здвоєний дросель L_1 і конденсатори C_y , та фільтр симетричних (диференційних) завад, що включає дроселі L_2 і конденсатори C_x .

Здвоєний дросель L_1 є ефективним засобом ослаблення несиметричних завад. Обмотки дроселя однакові і намотані на одному осерді. Отже, симетричному струму двохпровідної лінії здвоєний дросель практично не створює додаткового електричного опору. При цьому за рахунок зустрічного включення магнітних полів від симетричного струму незалежно від його значення осердя дроселя не насичується. Разом з тим для несиметричних струмів завад, викликаних різницею потенціалів контуру заземлення, магнітні потоки обмоток складаються зустрічно, так, що індуктивність кожної з обмоток дроселя зростає на величину взаємної індуктивності між обмотками.

Недоліком схеми (рисунок 2.5) є наявність трьох індуктивних елементів, намотаних на різних осердях. .

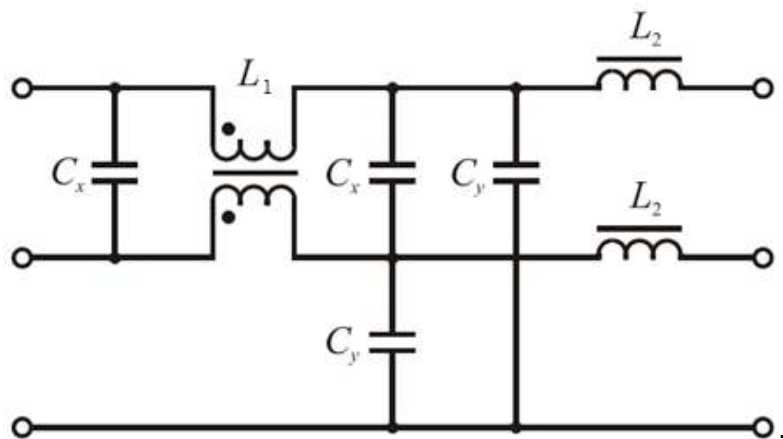


Рисунок 2.5 Схема мережного фільтра завад

В даній роботі пропонується розглянути гібридний здвоєний дросель, що об'єднує функції дроселів L_1 та L_2 в одному індуктивному елементі, який одночасно входить до фільтра симетричної і диференційної завад. Це дозволить знизити вартість і масогабаритні показники фільтра.

2.4 Моделювання основних типів стабілізаторів.

2.4.1 Характеристика програмного середовища Matlab Simulink.

Пакет розширення Simulink у середовищі MATLAB є основним елементом інтерактивного програмного комплексу, який призначений для математичного моделювання лінійних і нелінійних динамічних систем, а також пристроїв, що описуються функціональними схемами, відомими як S-моделі. Simulink є типовим прикладом візуально орієнтованих мов програмування. У процесі створення моделі код генерується автоматично шляхом додавання обраних блоків, їх з'єднань та налаштування параметрів компонентів.

Simulink підтримує різні підходи до моделювання, зокрема у часовій та частотній областях, із застосуванням спектральних перетворень Фур'є, а також методів Монте-Карло (аналіз реакції на випадкові впливи) тощо.

Для створення функціональної схеми моделі Simulink пропонує розширену бібліотеку блоків і вбудований редактор схем. Він базується на графічному інтерфейсі, що дозволяє переносити необхідні блоки на робочу область, після чого їх входи і виходи з'єднуються між собою лініями. У результаті створюється схема системи або обладнання, яка і є моделлю.

S-модель є програмою, яку можна переглянути за допомогою текстового редактора або редактора файлів MATLAB. Файли моделей мають розширення .mdl, але вони можуть бути доволі великими: навіть для простих моделей ці файли можуть налічувати тисячі рядків коду.

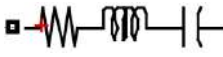
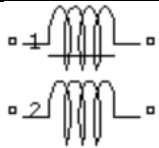
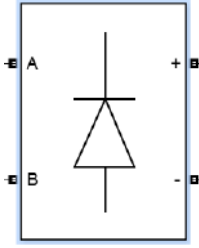
Simulink автоматизує найбільш складний етап моделювання — складання та розв'язання систем алгебраїчних і диференціальних рівнянь, які описують модель. Це забезпечує зручний і наочний контроль за поведінкою створеної користувачем віртуальної системи.

Simulink адаптує математичний опис моделі у процесі додавання нових блоків. Бібліотека компонентів містить джерела сигналів із різними часовими залежностями, масштабуючі елементи, лінійні та нелінійні перетворювачі з різноманітними передаточними характеристиками, а також блоки для інтегрування, диференціювання і квантування.

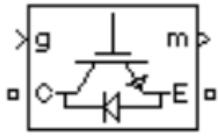
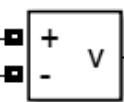
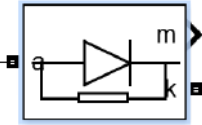
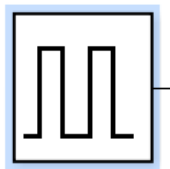
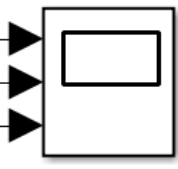
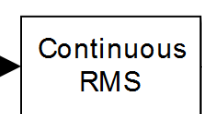
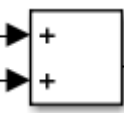
Також бібліотека містить набір віртуальних вимірювальних приладів, від простих вольтметрів та амперметрів до універсальних осцилографів, які дозволяють переглядати часові залежності вихідних параметрів моделі, наприклад струмів або напруг.

Характеристики блоків, які використовувалися для створення моделей, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Характеристика блоків Simulink, застосованих під час моделювання.

Найменування компонента	Графічне позначення	Опис
Послідовне RLC коло (Series RLC branch)		Реалізує один резистор, індуктивність або конденсатор, або їх послідовне поєднання
Взаємна індуктивність (Mutual Inductance)		Реалізація індуктивностей зі взаємним зв'язком
Універсальний діодний міст (Universal Bridge)		Реалізує міст обраних пристроїв силової електроніки (діодів, тиристорів та ін.). Послідовний RC демпфер під'єднано паралельно кожному перемикаючому пристрою.

Продовження таблиці 2.1

Найменування компонента	Графічне позначення	Опис
IGBT/Diode		Спрощена модель транзисторно діодної пари, керованої зовнішнім генератором.
Вольтметр (Voltage Measurement)		Ідеальний вольтметр
Діод Diode		Діод. Модель дозволяє широкий спектр параметрів
Генератор імпульсів Pulse Generator		Генератор імпульсів.
Джерело змінної напруги AC Voltage Source		Джерело змінної напруги
Осцилограф Scope and Floating Scope		Осцилограф
Вимірювач діючого значення CRMS		Дозволяє вимірювати середньоквадратичне значення враховуючи всі відліки сигналу.
Сумстор Sum, Add, Subtract, Sum of Elements		Реалізує функцію суми сигналів

Таким чином, можливості Simulink охоплюють завдання математичного моделювання складних динамічних систем у фізиці, електро-

і радіотехніці, а, отже, даний пакет може бути застосований для створення моделей імпульсних стабілізаторів.

2.4.2 Методика створення моделей. Результати моделювання

Моделі імпульсних джерел живлення з фільтром та без фільтра завад на основі кожного типу стабілізатора, наведеного у підрозділі 2.2, було створено, у відповідності з структурною схемою, зображеною на рисунку 2.6. В якості індуктивного елемента фільтра використано гібридний здвоєний дросель.



Рисунок 2.6 – Структурна схема імпульсного джерела живлення з фільтром завад, підключеного до мережі з паразитними параметрами

Оцінка рівня завад проводилась за загальноприйнятою методикою шляхом вимірювання коефіцієнта гармонік напруги мережі U_m (рис.1). Коефіцієнт гармонік – величина, що виражає ступінь нелінійних спотворень сигналу, що дорівнює відношенню середньоквадратичної напруги суми вищих гармонік сигналу, крім першої, до напруги першої гармоніки.

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1},$$

де K_{Γ} – коефіцієнт гармонік, $U_1, U_2, \dots, U_n$ – відповідні гармоніки сигналу.

В ідеальну модель мережі живлення було введено паразитні опір та індуктивність, що наближає її параметри до реальної.

Моделі джерел живлення на основі трьох типів імпульсних стабілізаторів, показані на рисунках 2.7 – 2.12.

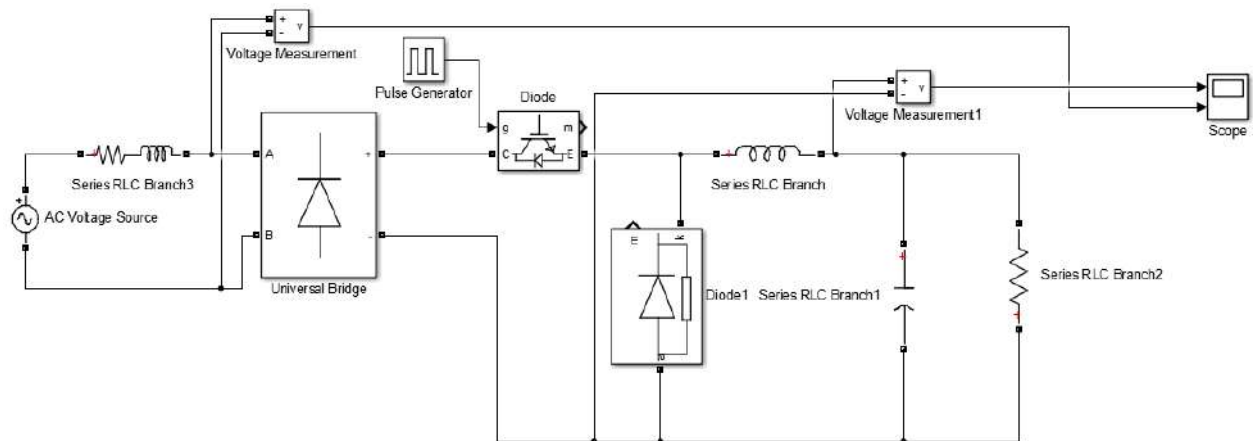


Рисунок 2.7 – ІДЕ з понижувальним стабілізатором, без фільтра завади

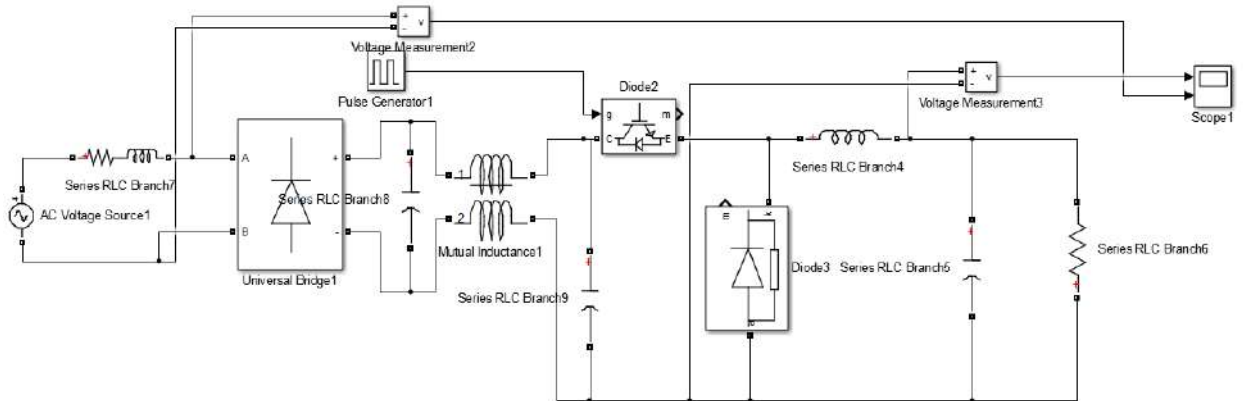


Рисунок 2.8 – ІДЕ з понижувальним стабілізатором, з фільтром завади.

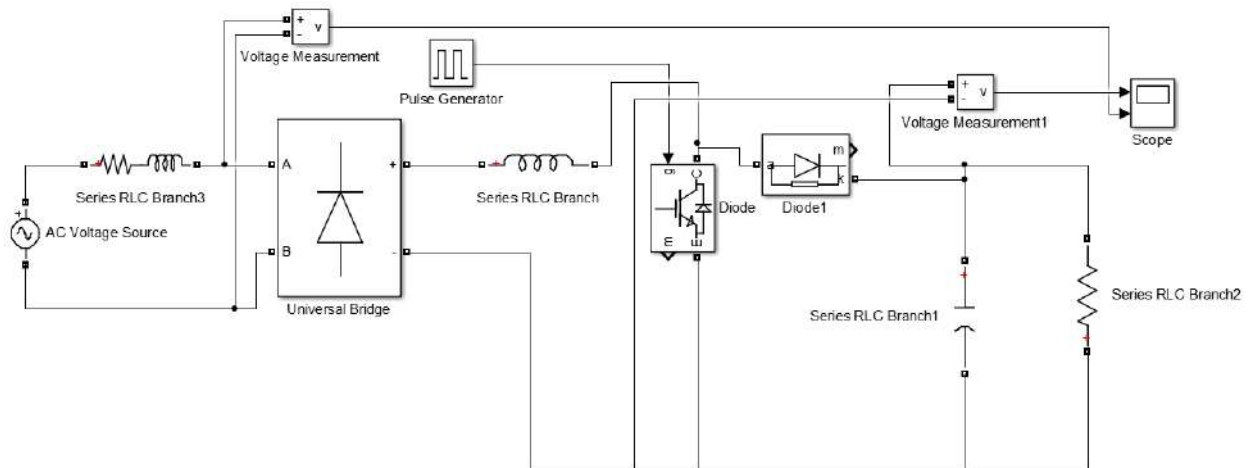


Рисунок 2.9 – ІДЕ з підвищувальним стабілізатором, без фільтру завад

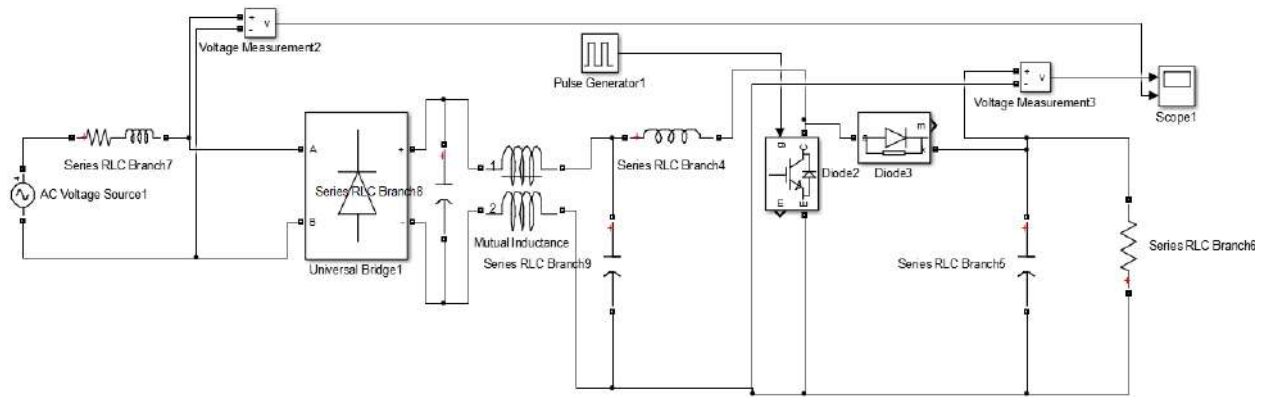


Рисунок 2.10 – ІДЕ з підвищувальним стабілізатором з фільтром завад

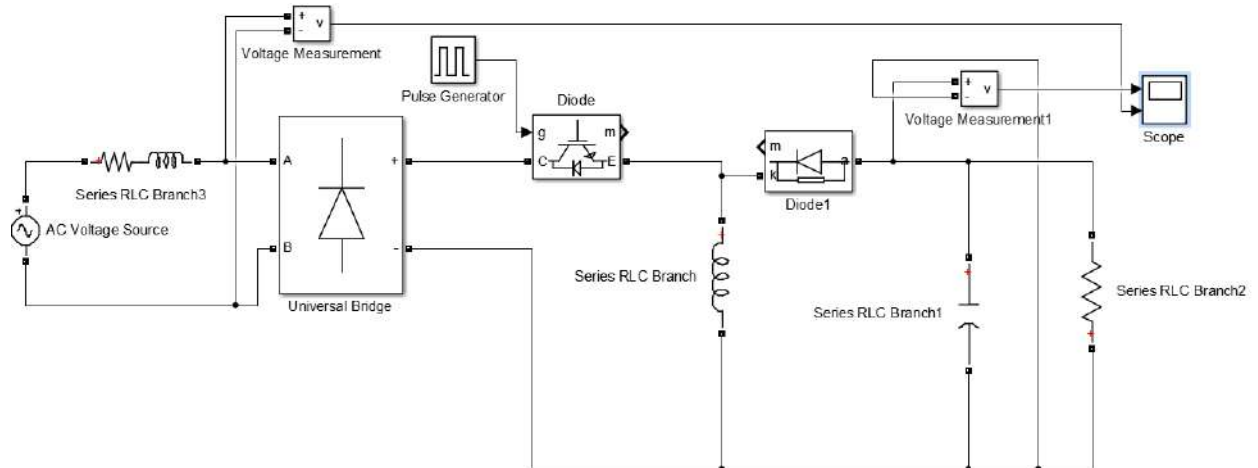


Рисунок 2.11 – ІДЕ з інвертуючим стабілізатором, без фільтру завад

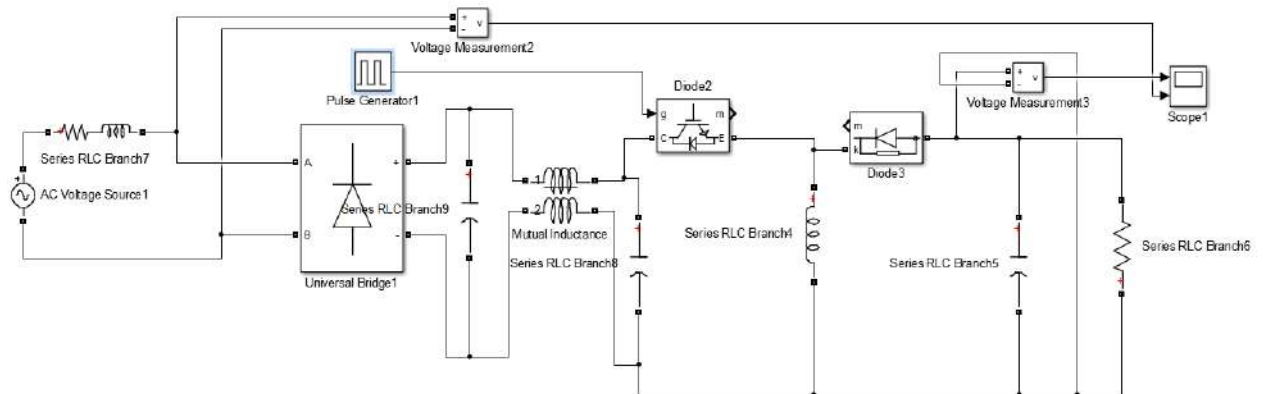


Рисунок 2.12 – ІДЕ з інвертуючим стабілізатором з фільтром завад

Результати моделювання у, виконаного за наведеними вище моделями, у вигляді осцилограм та спектрів сигналів наведено на рисунках 2.13 – 2.24. Параметри фільтрів, паразитні параметри мережі живлення, та робочі частоти в усіх моделях однакові.

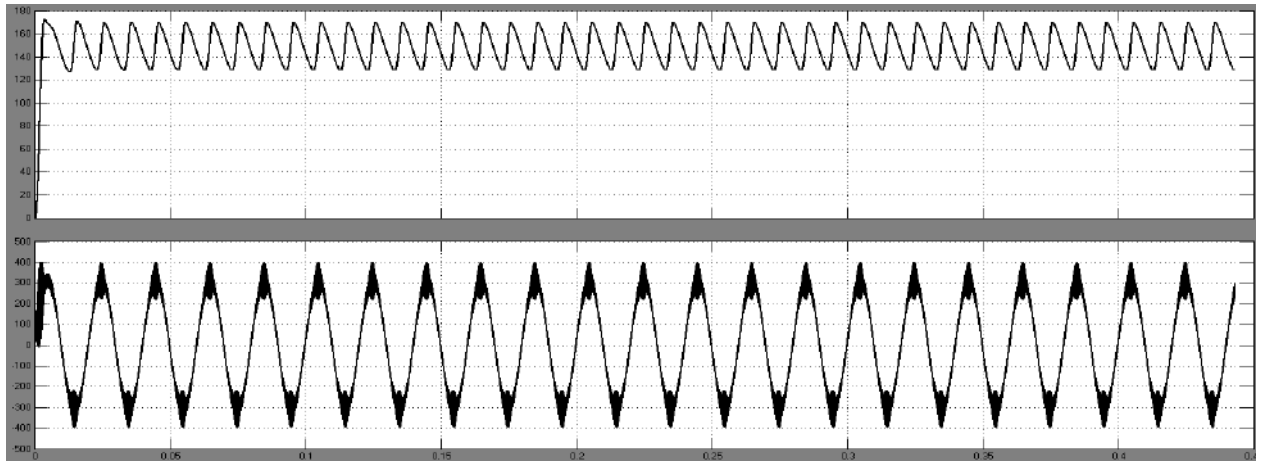


Рисунок. 2.13 – Осцилограми сигналів на вході та виході ІДЕ з понижувальним стабілізатором без фільтру завади та напруги мережі.

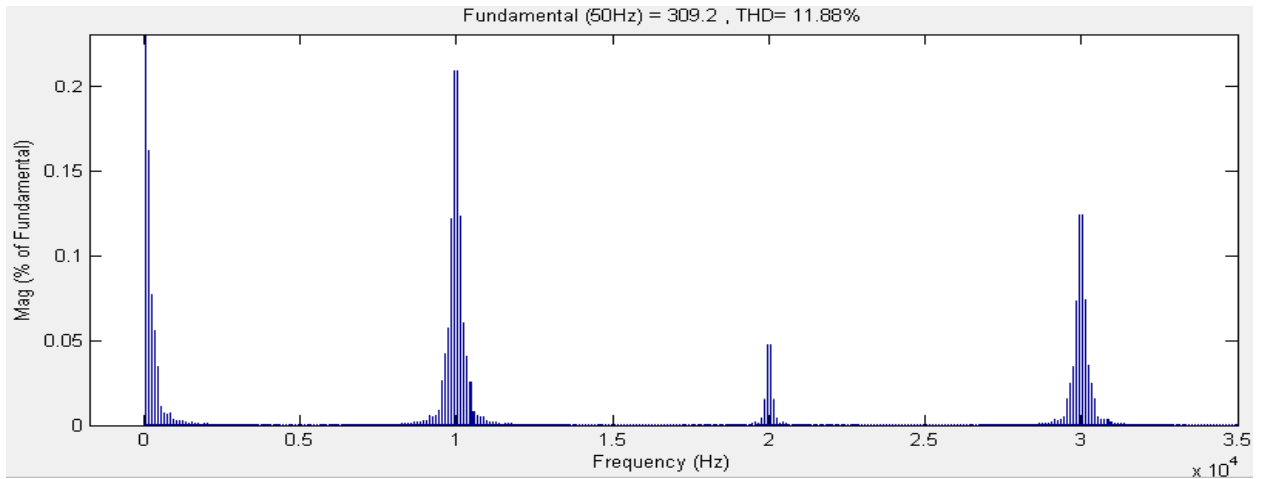


Рисунок 2.14 – Спектр напруги мережі живлення ІДЕ з понижувальним стабілізатором, без фільтру завади

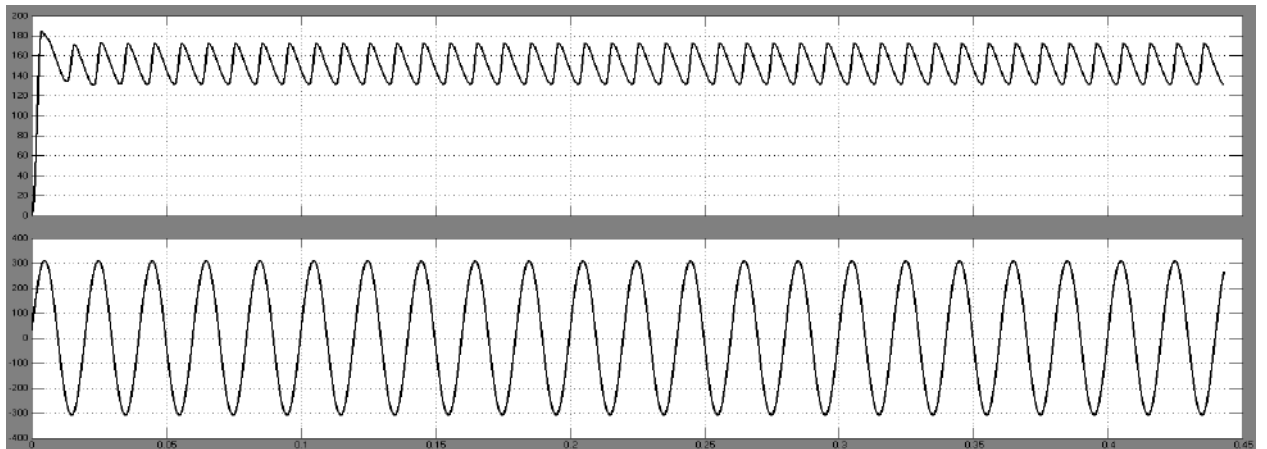


Рисунок 2.15 – Осцилограми вихідної та вхідної напруг ІДЕ з понижувальним стабілізатором, з фільтром завади

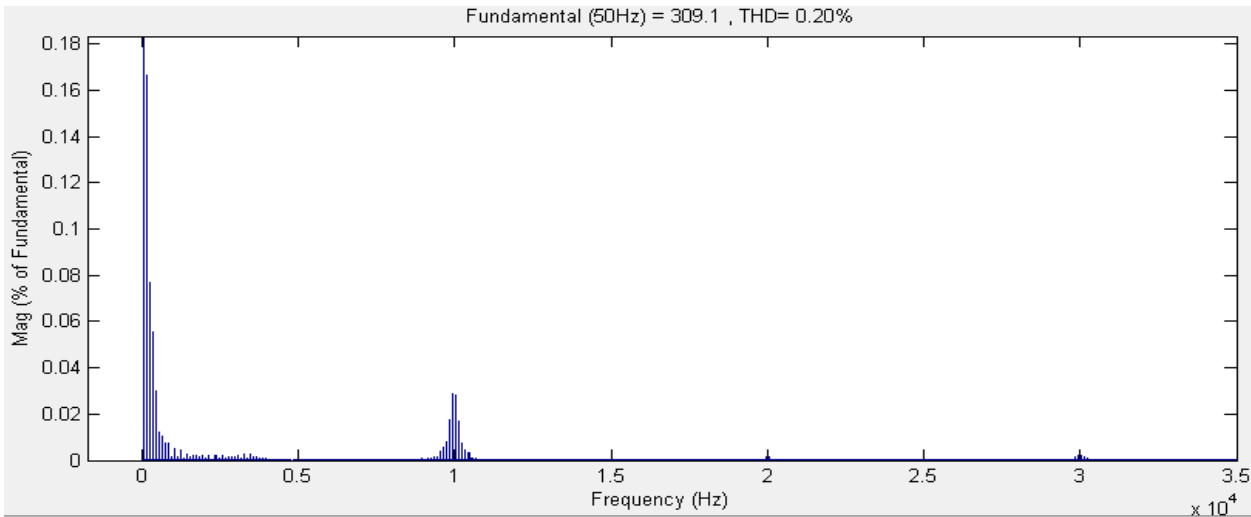


Рисунок 2.16 Спектр напруги мережі живлення ІДЕ з понижувальним стабілізатором, з фільтром завади

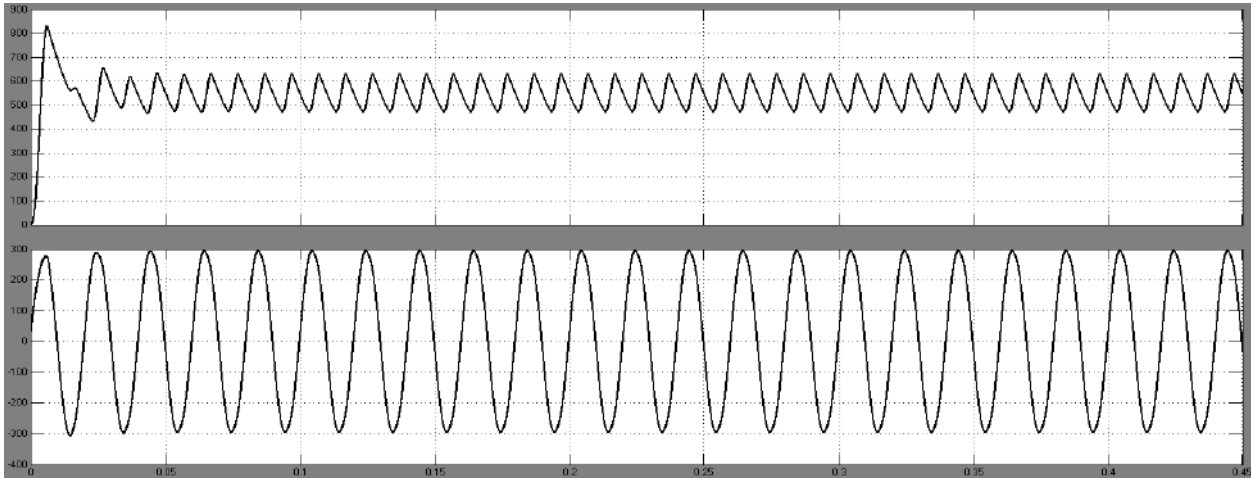


Рисунок 2.17 – ІДЕ з підвищувальним стабілізатором, без фільтру завад

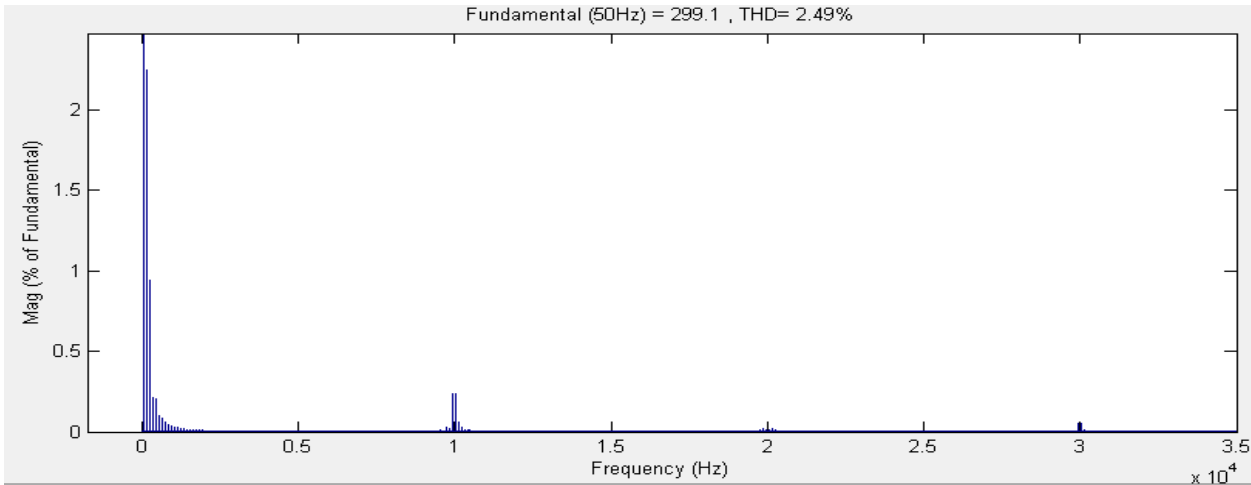


Рисунок 2.18 – Спектр напруги мережі живлення ІДЕ з підвищувальним стабілізатором, без фільтру завад

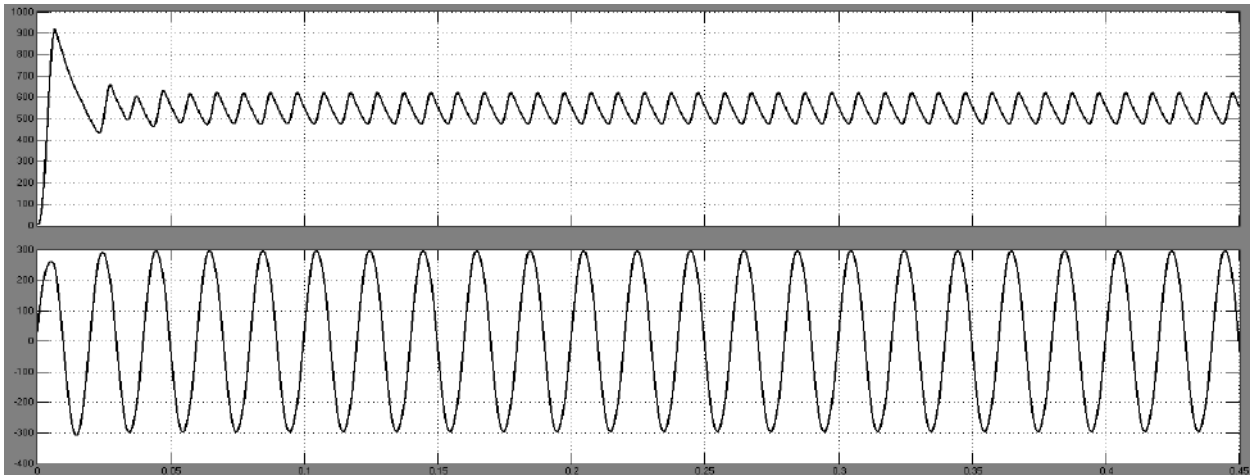


Рисунок 2.19 – Осцилограми вихідної та вхідної напруг ІДЕ з підвищувальним стабілізатором з фільтром завад

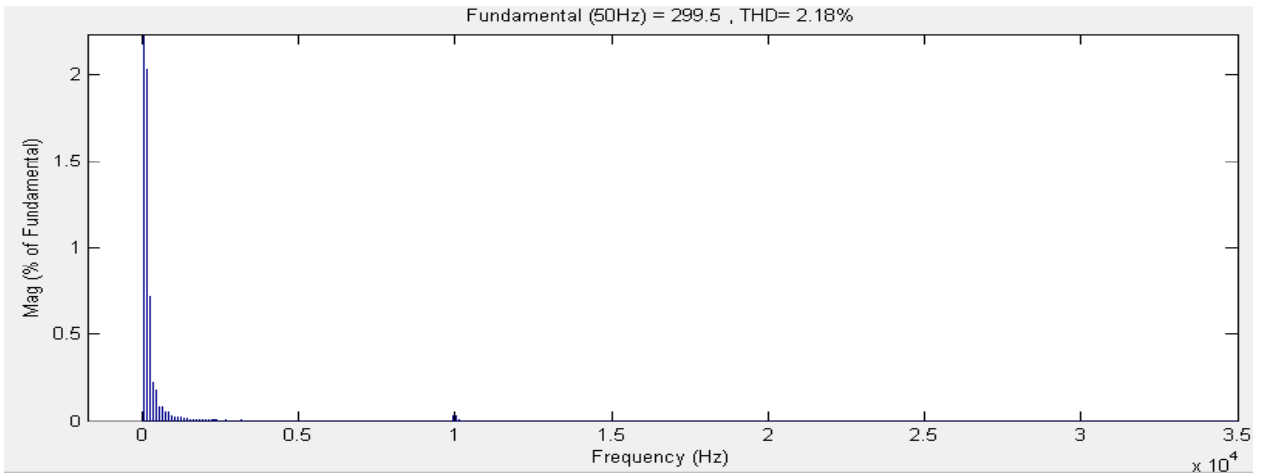


Рисунок 2.20 – Спектр напруги мережі живлення ІДЕ з підвищувальним стабілізатором з фільтром завад

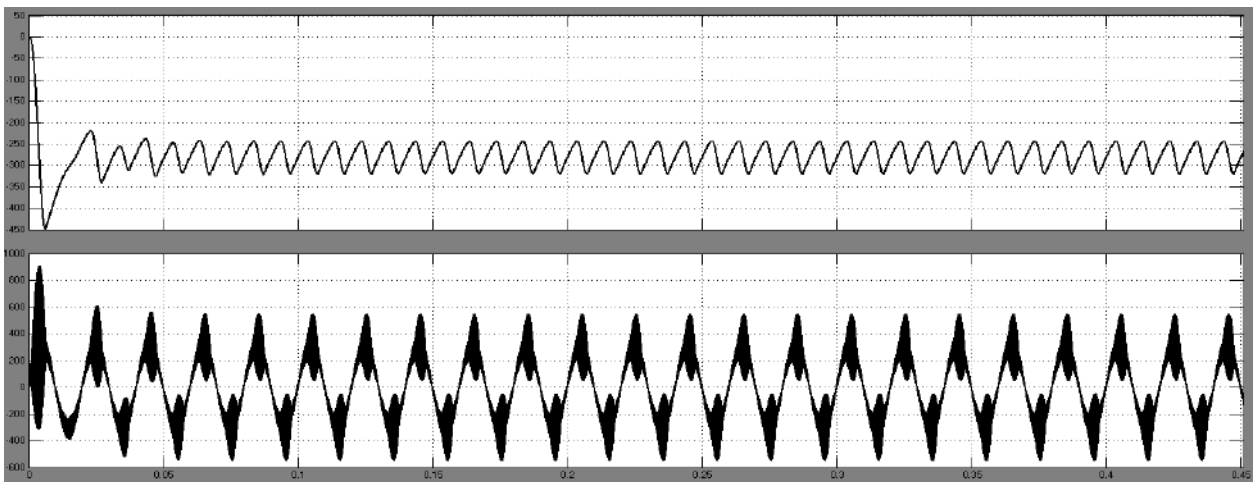


Рисунок 2.21 – Осцилограми вихідної та вхідної напруг ІДЕ з полярно-реверсуючим стабілізатором, без фільтру завад

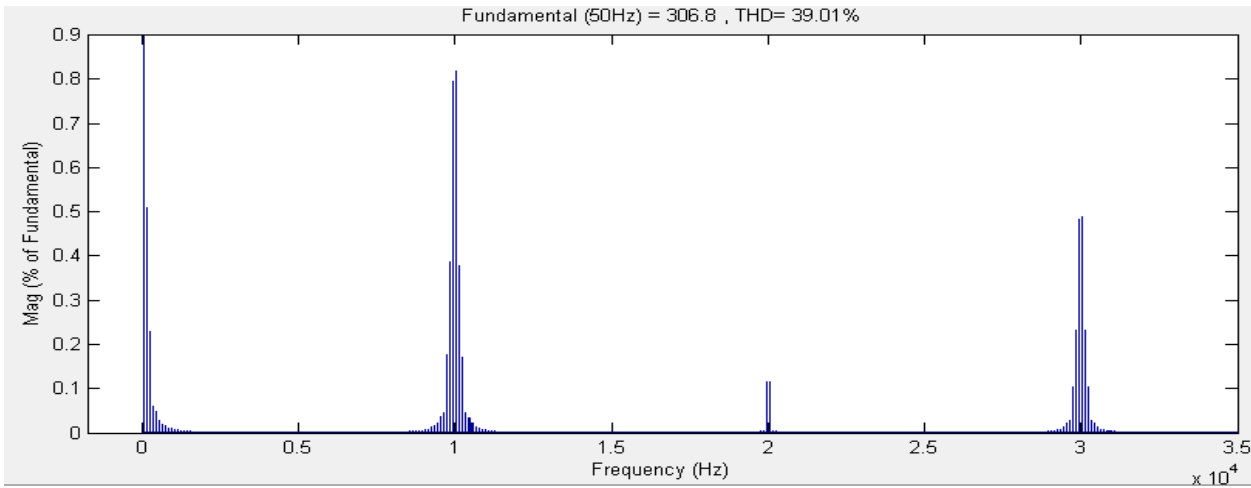


Рисунок 2.22 – Спектр напруги мережі живлення ІДЕ з полярно-реверсуючим стабілізатором без фільтру завад

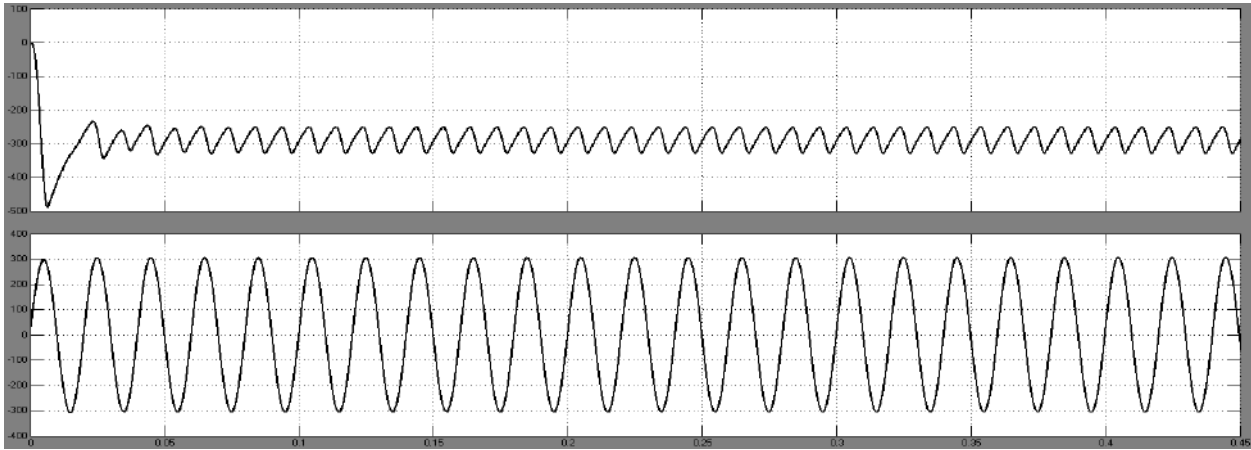


Рисунок 2.23 – Осцилограми вихідної та вхідної напруг ІДЕ з полярно-реверсуючим стабілізатором з фільтром завад

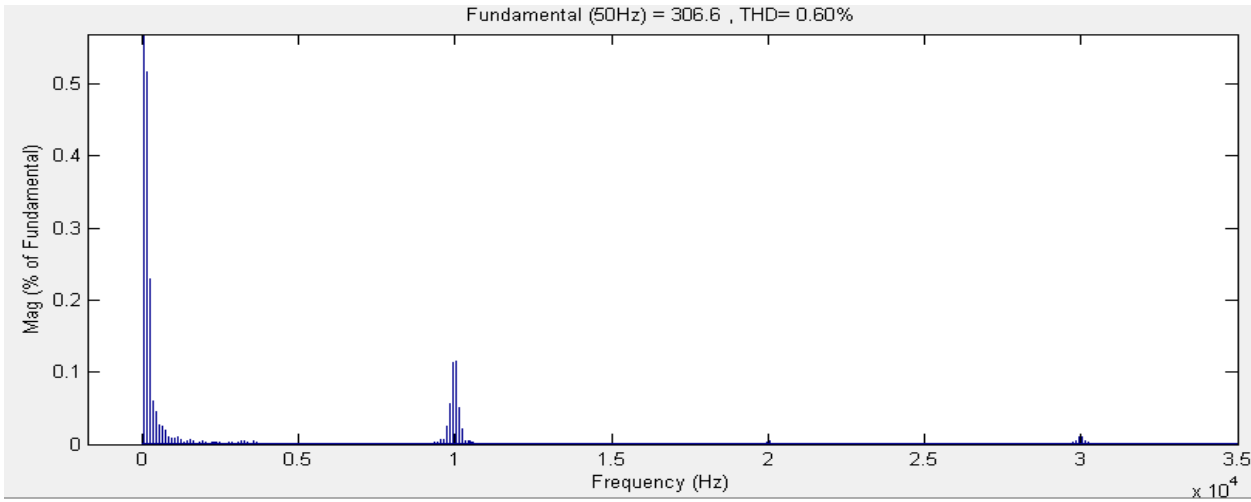


Рисунок 2.24 – Спектр напруги мережі живлення ІДЕ з полярно-реверсуючим стабілізатором з фільтром завад

З аналізу отриманих попередніх результатів (таблиця 2.1) можна зробити висновок, що без фільтру завад ІДЕ з полярно-реверсуючим стабілізатором має найвищий рівень завад, ІДЕ з підвищувальним стабілізатором – найнижчий.

Таблиця 2.1. Попередні результати порівняння завадоємисії від ІДЕ з різними типами стабілізаторів.

Тип застосовуваного стабілізатора	Кг (ІДЕ без фільтра), %	Кг (ІДЕ з фільтром), %	Відносне зменшення Кг при застосуванні фільтра, %
ІДЕ з понижувальним стабілізатором	11,88	0,20	98,3
ІДЕ з підвищувальним стабілізатором	2,49	2,18	12,4
ІДЕ з інвертуючим (полярно-реверсуючим) стабілізатором	39,01	0,60	98,5

За наявності фільтру найвищий рівень завад має ІДЕ з підвищувальним стабілізатором, а найнижчий ІДЕ з понижувальним стабілізатором. Це пояснюється тим, що особливістю роботи понижувального стабілізатора є безперервність струму через навантаження, тобто низький рівень завад, які генеруються в навантаженні, і перервний характер вхідного струму, тобто підвищений рівень завад, які генеруються в мережу. Підвищувальний – навпаки, має безперервний характер струму з

мережі і перервний струм через навантаження. Інвертуючий стабілізатор володіє підвищеною завадоємністю в навантаження і мережу, оскільки характер струму на вході і виході стабілізатора переривчастий.

Завадоємність відбувається, переважно, на частотах рівних, та кратних робочій частоті імпульсного стабілізатора. В даному випадку вона складала 10 кГц. За відсутності фільтрів смуга частот сигналів завад досягала 500 кГц, що перевищує робочу частоту в 50 разів. Найскладніше подавити завади на частотах до одиниць кілогерц, які знаходяться ближче до основної частоти корисної напруги (50 Гц).

2.5 Висновки

Розроблені моделі імпульсних джерел електроживлення (ІДЕ) є достовірними і дозволяють проводити аналіз залежності рівня кондуктивних завад, які випромінюються в електромережу, від параметрів самого ІДЕ.

Для забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) використання фільтрації є надзвичайно важливим. Її ефективність повинна бути достатньо високою, щоб відповідати допустимим стандартам рівнів завад.

Серед досліджуваних стабілізаторів найнижча ефективність фільтрації спостерігається в ІДЕ з понижувальним стабілізатором. Це пов'язано з тим, що в цій схемі відзначається високий рівень завад на низьких частотах, до 1 кГц. Для ефективного подавлення таких завад потрібні великі значення індуктивності та ємності у фільтрі, що негативно впливає на коефіцієнт корисної дії (ККД) і коефіцієнт потужності.

Оскільки цей тип стабілізатора є одним із найбільш поширених, його дослідження заслуговує особливої уваги для оптимізації показників фільтрації та зменшення впливу завад.

3 ПОШУК ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ІМПУЛЬСНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

3.1 Дослідження залежності завадозахисності імпульсних джерел електроенергії від паразитних параметрів електромережі

Поширення кондуктивних завад через мережу живлення пов'язане з наявністю паразитного внутрішнього опору R_p та індуктивності мережі L_p . (Рис. 2.6) Таким чином, рівень кондуктивних завад від імпульсних джерел живлення залежить від експлуатаційних параметрів мережі.

Змінюючи значення паразитних опору та індуктивності мережі було визначено коефіцієнт гармонік напруги мережі для трьох типів стабілізаторів. Результати наведені в таблицях 3.1 – 3.3.

Таблиця 3.1 Результати досліджень коефіцієнта гармонік напруги мережі для ІДЕ з понижувальним стабілізатором .

Паразитний опір мережі, Ом	Паразитна індуктивність мережі мкГн	Кг (ІДЕ без фільтра), %	Кг (ІДЕ з фільтром), %
0,5	0	0,2	0,1
	5	6,5	0,1
	10	11,94	0,1
	15	17,46	0,11
	20	22,87	0,12
	25	28,13	0,13
1	0	0,39	0,2
	5	6,47	0,2
	10	11,88	0,2
	15	17,37	0,2
	20	22,74	0,21
	25	27,97	0,21

Продовження таблиці 3.1

Паразитний опір мережі, Ом	Паразитна індуктивність мережі мкГн	Кг (ІДЕ без фільтра), %	Кг (ІДЕ з фільтром), %
1,5	0	0,59	0,3
	5	6,46	0,3
	10	11,83	0,3
	15	17,28	0,3
	20	22,62	0,3
	25	27,82	0,31

Таблиця 3.2 Результати досліджень коефіцієнта гармонік напруги мережі для ІДЕ з підвищувальним стабілізатором

Паразитний опір мережі, Ом	Паразитна індуктивність мережі мкГн	Кг (ІДЕ без фільтра), %	Кг (ІДЕ з фільтром), %
0,5	0	1,27	1,11
	5	1,28	1,11
	10	1,29	1,11
	15	1,31	1,11
	20	1,34	1,11
	25	1,37	1,11
1	0	2,48	2,18
	5	2,48	2,18
	10	2,49	2,18
	15	2,5	2,18
	20	2,51	2,18
	25	2,53	2,18
1,5	0	3,62	3,22
	5	3,62	3,22
	10	3,62	3,21
	15	3,63	3,21
	20	3,64	3,21
	25	3,65	3,21

Таблиця 3.3 Результати досліджень коефіцієнта гармонік напруги мережі для ІДЕ з інвертуючим (полярно-реверсуючим) стабілізатором.

Паразитний опір мережі, Ом	Паразитна індуктивність мережі мкГн	Кг (ІДЕ без фільтра), %	Кг (ІДЕ з фільтром), %
0,5	0	0,68	0,3
	5	20,87	0,3
	10	39,36	0,31
	15	57,32	0,34
	20	74,95	0,37
	25	92,1	0,42
1	0	1,34	0,59
	5	20,72	0,59
	10	39,01	0,6
	15	56,82	0,61
	20	74,26	0,63
	25	91,25	0,66
1,5	0	1,99	0,88
	5	20,58	0,88
	10	38,68	0,89
	15	56,33	0,9
	20	73,59	0,91
	25	90,41	0,93

Відповідно до отриманих даних при зміні опору мережі $R_p = 0,5..1,5$ Ом коефіцієнт гармонік змінюється не так відчутно, як при зміні індуктивності мережі.

Залежності коефіцієнта гармонік від індуктивності мережі, за відсутності фільтра завад, наведені на рисунку 3.1.

З рис. 3.1 можна зробити висновок, що найнижчий коефіцієнт гармонік, незалежний від індуктивності мережі, отримано при використанні

понижувального типу стабілізатора, найвищий – при використанні інвертуючого стабілізатора.

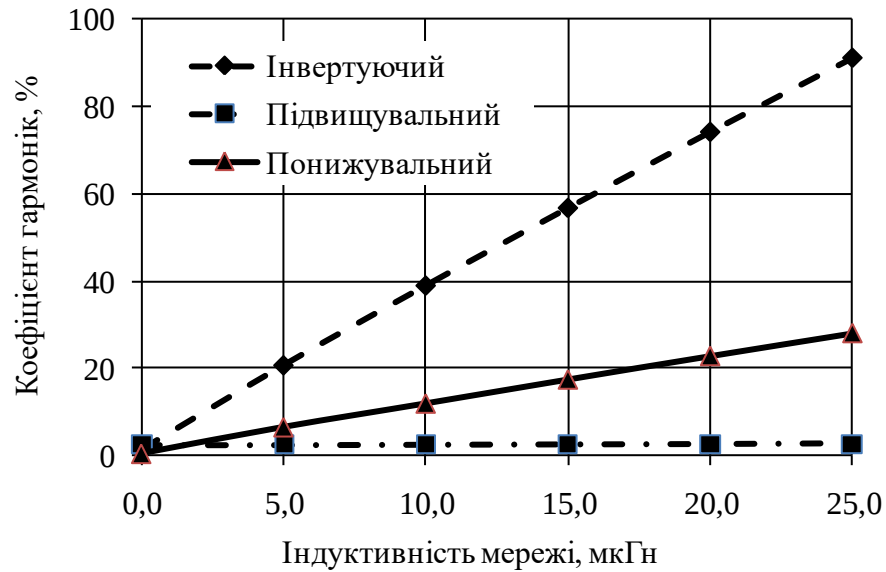


Рисунок 3.1 – Залежність коефіцієнта гармонік від індуктивності мережі, за відсутності фільтра завад

Залежності коефіцієнта гармонік від індуктивності мережі, за наявності фільтра завад, наведені на рисунку 3.2.

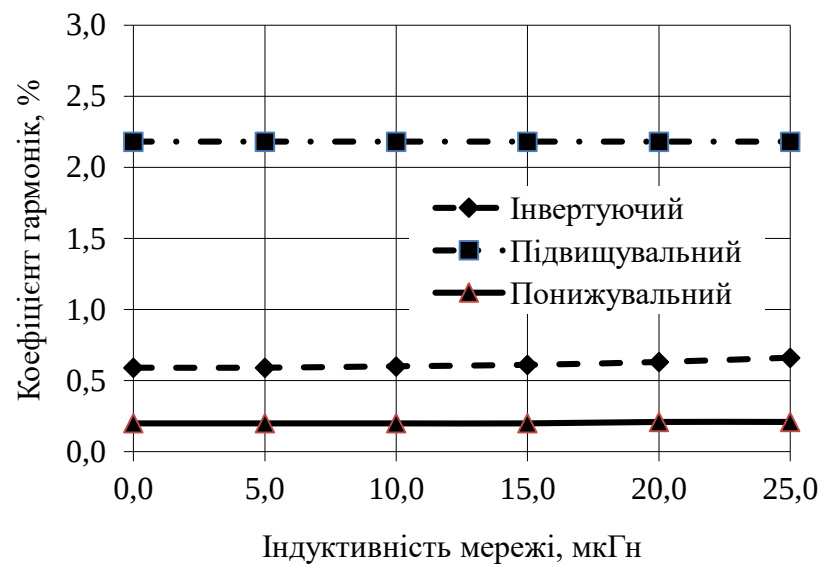


Рисунок 3.2 – Залежність коефіцієнта гармонік від індуктивності мережі, з фільтром завад

Проаналізувавши результати дослідження варто зазначити, що наявність фільтра завад на вході ІДЕ мінімізує вплив паразитних параметрів

мережі на рівень завадоємисії. З точки зору ЕМС можна рекомендувати застосування понижувальних стабілізаторів, за умови, що зі сторони їх навантаження не висувається суворих вимог до рівня завад по виходу ІДЕ. Проте з причин, наведених в підрозділі 2.1, найбільшого поширення набули підвищувальні стабілізатори.

3.2 Дослідження залежності завадоємисії імпульсних джерел електроенергії від робочої частоти.

Значення робочої частоти ІДЕ вибирається як результат компромісу між динамічними втратами в ключових елементах та габаритними розмірами намоточних елементів. Так при високому значенні робочої частоти внаслідок збільшення кількості перемикачів ключових елементів за одиницю часу зростають втрати енергії, обумовлені тим, що ключовий елемент перемикається не миттєво, а деякий час перебуває в активній області. Як результат, знижується ККД ІДЕ. Проте на високих частотах для досягнення необхідних технічних характеристик, потрібні менші значення індуктивностей трансформаторів та дроселів, отже зменшуються їх габарити, маса і вартість. Нижчі значення робочої частоти призводять до менших динамічних втрат, але більших габаритів намоточних виробів.

З точки зору ЕМС логічно припустити, що рівень завад при підвищенні робочої частоти буде зростати, за рахунок випромінювання та паразитних індуктивних і ємнісних зв'язків.

Розроблені моделі ІДЕ не враховують конструктивних паразитних зв'язків. Тому в даних дослідженнях враховано лише кондуктивні шляхи поширення завад і оцінено їх внесок в процес завадоємисії при збільшенні робочої частоти.

При постійних значеннях паразитних параметрів мережі та однакових параметрах фільтрів визначено залежності коефіцієнту гармонік напруги

мережі від робочої частоти ІДЕ за відсутності фільтра завад (рис. 3.3) і з фільтром (рис 3.6).

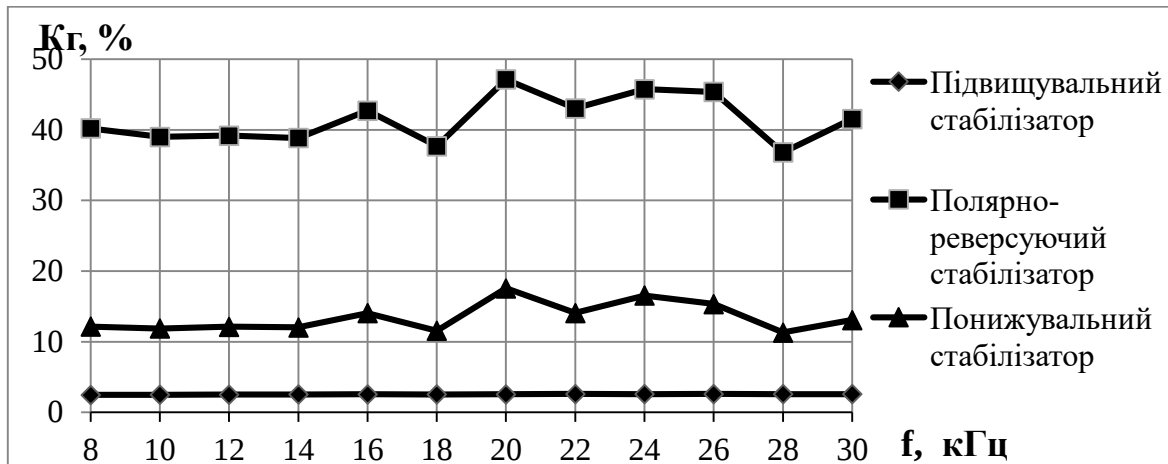


Рисунок 3.3 – Залежність коефіцієнту гармонік напруги мережі від робочої частоти ІДЕ за відсутності фільтра завад

На рисунку 3.3 присутні мінімуми і максимуми коефіцієнта гармонік на деяких частотах. Їх наявність пояснюється властивостями нелінійних елементів, використаних в моделі. Внаслідок інтермодуляції при дії на нелінійні елементи сигналу з частотою мережі та сигналу з робочою частотою виникають нові спектральні складові. Частоти та величини нових гармонік обумовлені частотами вхідних сигналів та характеристиками нелінійних елементів. Це підтверджують спектри напруги мережі визначені для ІДЕ на основі полярно-реверсуючого (інвертуючого) стабілізатора при робочій частоті 20 кГц (рис. 3.4), що відповідає максимуму коефіцієнта гармонік, та 18 кГц (рис. 3.5), що відповідає мінімуму коефіцієнта гармонік.

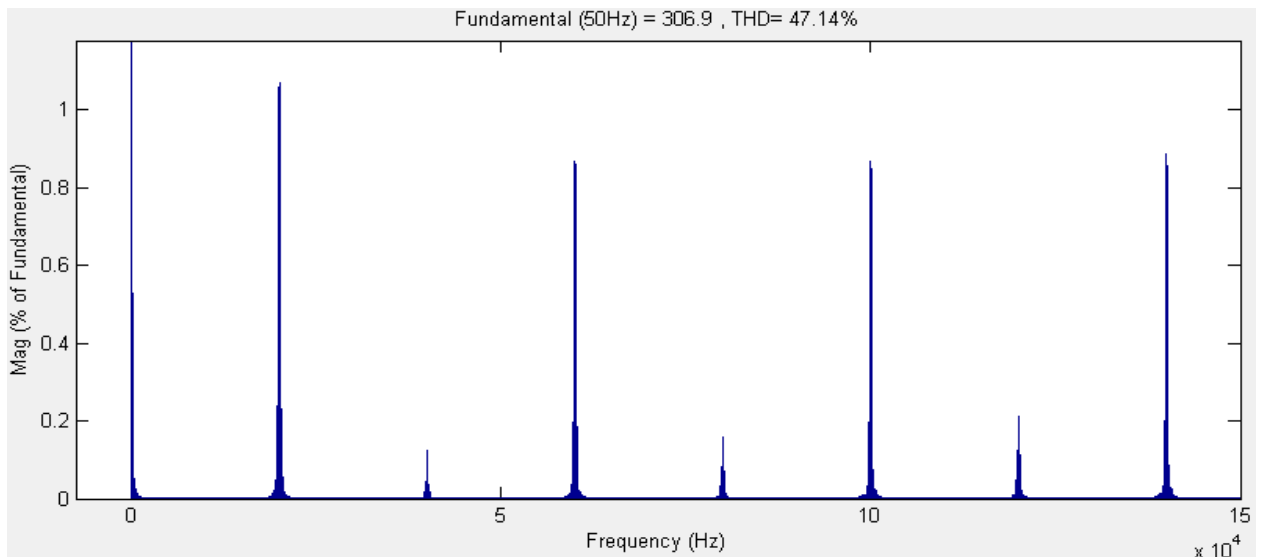


Рисунок 3.4 – Спектри напруги мережі, при робочій частоті ІДЕ 20 кГц

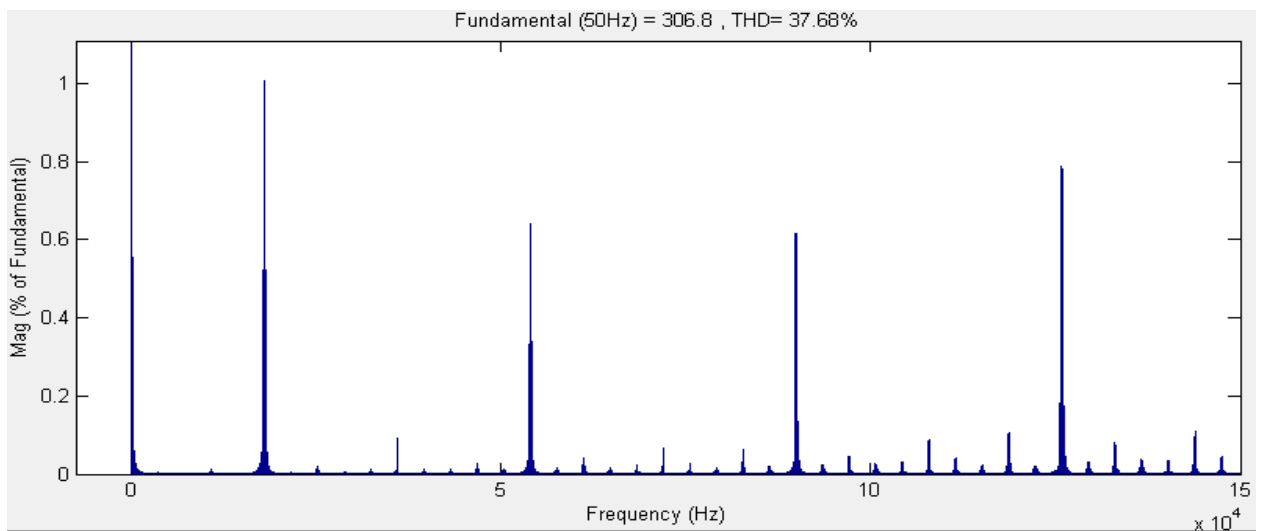


Рисунок 3.5 – Спектри напруги мережі, при робочій частоті ІДЕ 18 кГц

За умови застосування фільтра завад, коефіцієнт гармонік знижується і мало залежить від робочої частоти ІДЕ (рис. 3.6)

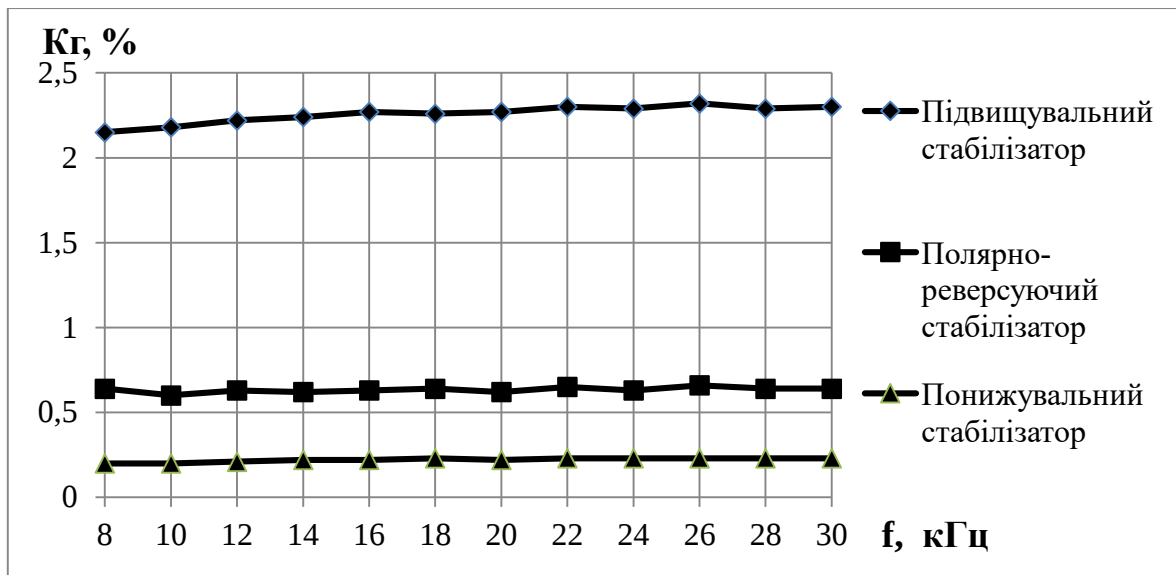


Рисунок 3.6 Залежність коефіцієнту гармонік напруги мережі від робочої частоти ІДЕ з фільтром завад

З огляду на наведені результати досліджень можна надати рекомендації, аналогічні до наведених в підрозділі 3.1, стосовно застосування різних типів стабілізаторів.

Також слід зазначити, що зміною робочої частоти неможливо суттєво вплинути на параметри ЕМС ІДЕ.

3.3 Дослідження залежності завадозахисності від параметрів фільтра завад

3.3.1 Залежність диференційної складової завади від параметрів фільтра

Параметри фільтра визначаються ємністю конденсаторів, а також власною і взаємною індуктивністю обмоток здвоєного гібридного дроселя, запропонованого у підрозділі 2.3 як індуктивний елемент. У процесі досліджень змінювалися характеристики здвоєного дроселя, оскільки ємність конденсаторів фільтра, з точки зору забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС), має бути максимально великою, і дослідження її впливу на завадозахисність не проводилося.

Однак максимальне значення ємності конденсаторів у мережних фільтрах обмежується типом використовуваних компонентів та вимогами безпеки. У таких фільтрах застосовуються керамічні та плівкові конденсатори з високою допустимою напругою. Їх максимальна ємність зазвичай не перевищує кілька мікрофард, хоча існують керамічні конденсатори з ємністю до 100 мкФ, які використовуються рідко через їх високу вартість. У всіх проведених дослідженнях ємність конденсаторів залишалася незмінною.

Для вивчення залежності диференційної складової завади від параметрів фільтра змінювалася взаємна індуктивність здвоєного дроселя, тоді як власна індуктивність обмоток залишалася постійною на рівні 2,1 мГн.

На рисунку 3.7 наведено залежності коефіцієнта гармонік напруги мережі від взаємної індуктивності здвоєного дроселя

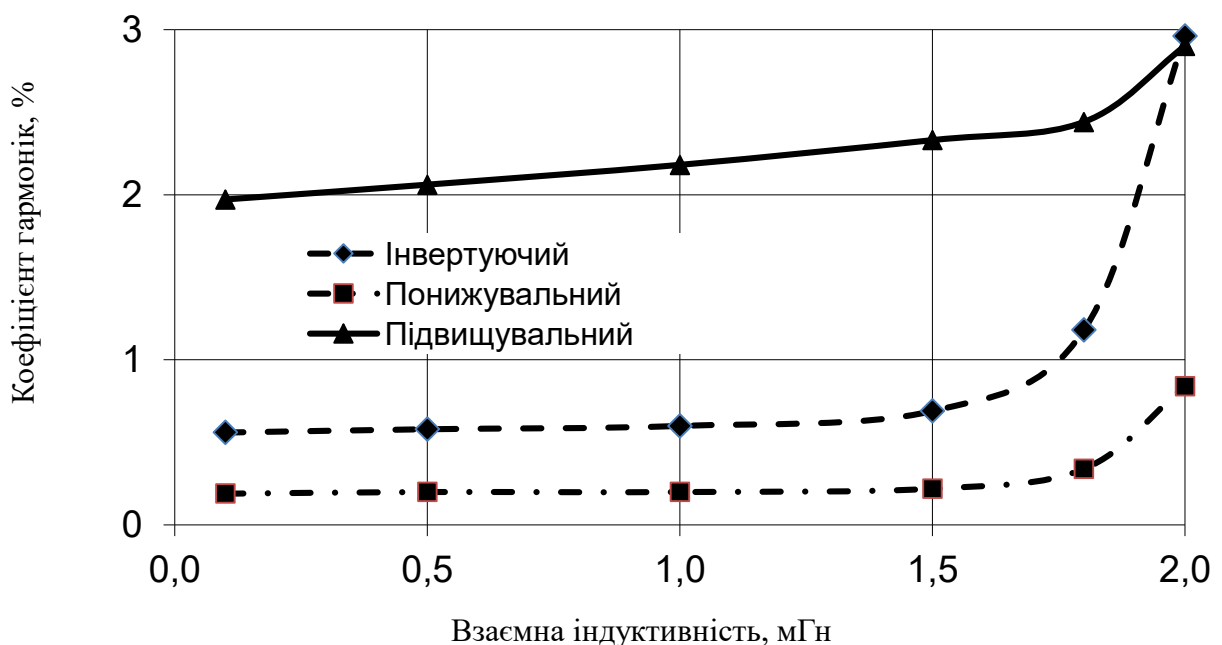


Рисунок 3.7. Залежність коефіцієнта гармонік напруги мережі від взаємної індуктивності здвоєного дроселя.

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що зі збільшенням взаємної індуктивності (коефіцієнта зв'язку) між обмотками дроселя зростає рівень диференційної складової завади на вході ІДЕ. Це пов'язано з тим, що обмотки дроселя намотані синфазно, тому магнітні потоки в осерді, створені прямим і зворотним струмом завади, взаємно компенсуються. Чим вищий коефіцієнт зв'язку, тим сильніше компенсуються потоки, що призводить до зменшення індуктивності дроселя і, відповідно, зниження опору диференційній складовій завади.

Таким чином, для визначення оптимальних параметрів гібридного здвоєного дроселя, які забезпечують необхідний рівень електромагнітної сумісності (ЕМС), необхідно враховувати не лише диференційну, але й синфазну складову завади у процесі досліджень.

3.3.2 Залежність завадоемісії від параметрів фільтра на прикладі ІДЕ з підвищувальним стабілізатором

Модель ІДЕ з підвищувальним стабілізатором була доповнена джерелом синфазної завади – AC Voltage Source 2 (рис. 3.8). Напруга завади через ємнісний зв'язок, утворений конденсаторами C12 і C13, подається на виводи живлення постійного струму після діодного мосту. Виділення синфазної завади, що потрапляє в мережу, здійснюється за допомогою резисторів R13, R14 і блоку суматора, який компенсує диференційний сигнал вхідного струму перетворювача. Ємнісний зв'язок між входом пристрою (мережевими проводами) змодельовано через конденсатори C10 і C11. Значення синфазної завади (подвоєне) відображається на осцилографі Scope 2.

Додавання окремого джерела завади було необхідним, оскільки в стандартних моделях не враховуються конструктивні паразитні ємнісні та індуктивні зв'язки, а також вплив зовнішніх електромагнітних полів, які є основними джерелами синфазних завад у реальних конструкціях ІДЕ.

Змінюючи взаємну індуктивність обмоток дроселя, можна спостерігати зміни амплітуди синфазної завади на вході ІДЕ.

Для оцінки рівня завад використовуються різні критерії. Для диференційної складової це коефіцієнт гармонік, а для синфазної завади – ефективність фільтрації. Оскільки в моделі напруга джерела синфазної завади залишається постійною, рівень синфазної завади оцінюється за величиною синфазної напруги на вході ІДЕ.

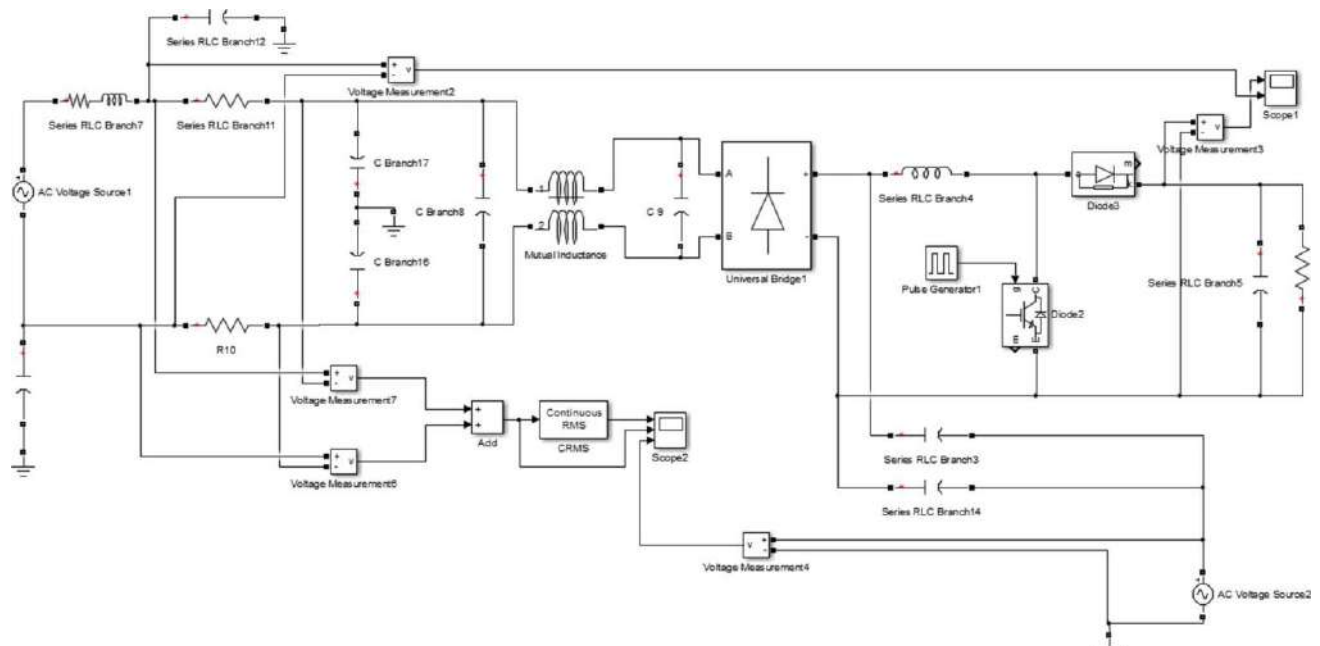


Рисунок 3.8 – ІДЕ з підвищувальним стабілізатором з джерелом синфазної завади

Для комплексної оцінки рівня завад пропонується функція

$$Y = 0,5 \cdot \frac{K_g}{K_{g \max}} + 0,5 \cdot \frac{U_s}{U_{s \max}},$$

де U_s – напруга синфазної завади, $U_{s \max}$ – максимальна напруга синфазної завади, K_g – коефіцієнт гармонік напруги мережі, $K_{g \max}$ – максимальне значення напруги мережі.

Дана функція є безрозмірна, максимальне її значення дорівнює одиниці. Коефіцієнти впливу диференційної та синфазної складової завади пропонується вважати однаковими, оскільки немає підстав вважати внесок певної складової в погіршення електромагнітної обстановки суттєвішим за іншу.

Було визначено залежність напруги синфазної завади, коефіцієнта гармонік напруги мережі та функції Y від взаємної індуктивності обмоток дроселя (рис. 3.9). Власна індуктивність обмоток дроселя в даному випадку дорівнювала 4,1 мГн і залишалась незмінною.

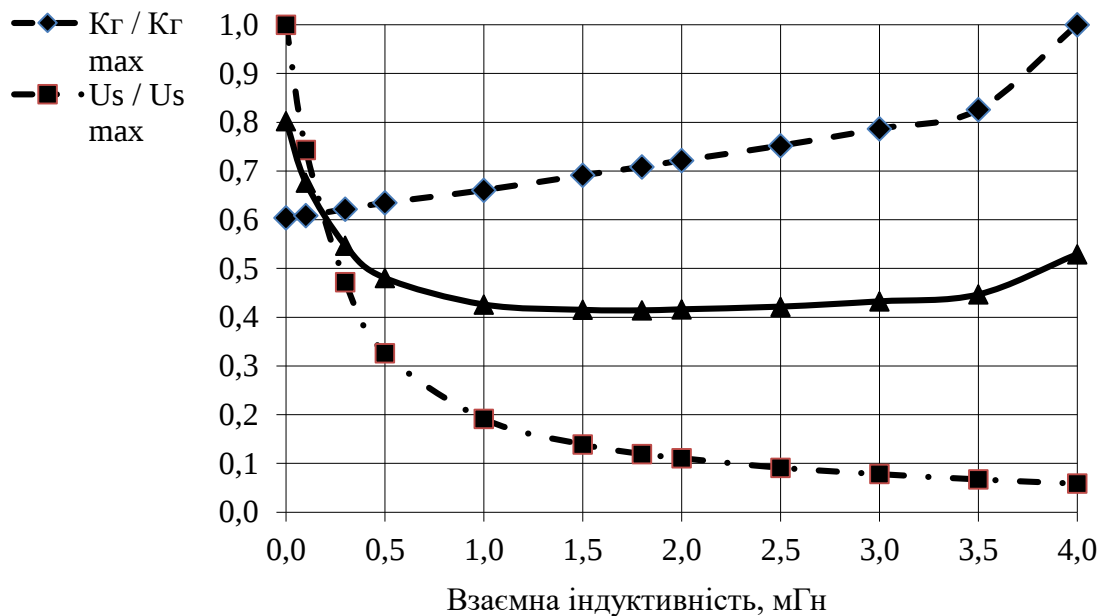


Рисунок 3.9 – Залежність напруги синфазної завади, коефіцієнта гармонік напруги мережі та функції Y від взаємної індуктивності обмоток дроселя

З результатів можна зробити висновок: функція Y має мінімум при певному значенні взаємної індуктивності. Отже, існують оптимальне значення взаємної індуктивності при якому в однаковій мірі ефективно подавляються синфазна та диференційна складові завади.

Крім взаємної індуктивності може бути змінена індуктивність однієї або обох обмоток дроселя. При цьому можливі ефекти взаємодії цих двох факторів.

З метою більш детального дослідження впливу параметрів фільтра на величину завад було проведено повний двохфакторний експеримент 2^3 при якому в якості факторів виступали взаємна індуктивність та власна індуктивність обмоток, в якості вихідного параметра - функція комплексної оцінки рівня завад Y .

Результати, отримані після моделювання дев'яти можливих комбінацій параметрів фільтра (табл. 3.4) були апроксимовані поліномом другого степеня.

$$Y(L, Lm) = c_1 + c_2L + c_3Lm + c_4LLm + c_5L^2 + c_6Lm^2$$

Коефіцієнти регресії розраховані за методом найменших квадратів.

Таблиця 3.4 Результати моделювання

L, мГн	Lm, мГн	K _Г , %	U _s , В	Y
3,1	1	1,62	0,445	0,852
5,1	1	1,42	0,050	0,365
7,1	1	1,24	0,027	0,300
3,1	2	1,80	0,089	0,491
5,1	2	1,53	0,036	0,373
7,1	2	1,33	0,022	0,314
3,1	3	2,3	0,052	0,558
5,1	3	1,66	0,028	0,392
7,1	3	1,42	0,019	0,330

Розрахунки проводились в середовищі Mathcad за програмою, розміщеною в додатку Б.

Функція комплексної оцінки рівня завад з розрахованими коефіцієнтами регресії

$$Y(L, Lm) = 0,779 - 0,436L - 0,267Lm + 0,081LLm + 0,098L^2 + 0,074Lm^2$$

Результати моделювання показали, що при будь-яких значеннях власних індуктивностей дроселя існує оптимальне значення індуктивності

зв'язку, при якому завади мінімальні.

Було проведено додаткове дослідження впливу несиметричності власних індуктивностей дроселя на завадоємісію. При постійній індуктивності однієї з обмоток $L_2 = 4$ мГн та постійній взаємній індуктивності $L_m = 1,5$ мГн змінювались індуктивність обмотки L_1 . За графіком, на якому відображено результати розрахунків (рис. 3.10), можна зробити висновок, що при збільшенні однієї з індуктивностей зменшується рівень як диференційної так і синфазної складової завади. Оскільки конструктивно збільшення індуктивності досягається збільшенням кількості витків обмотки, то це призводить до зростання паразитної міжвиткової ємності. Ця ємність утворює з індуктивністю дроселя коливальний контур резонансна частота якого обмежує робочий діапазон роботи фільтра на високих частотах. Вище цієї резонансної частоти опір дроселя має ємнісний характер. Отже, максимальне значення власної індуктивності обмоток дроселя обмежується паразитною міжвитковою ємністю.

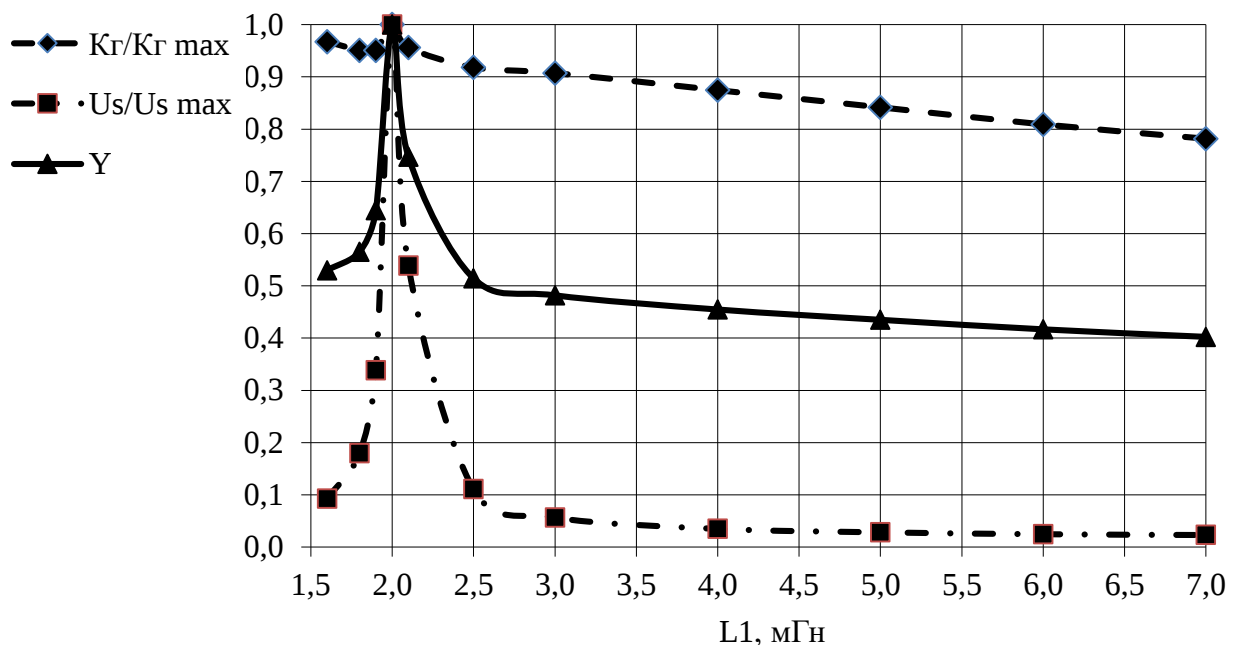


Рисунок 3.10 – Залежність напруги синфазної завади, коефіцієнта гармонік напруги мережі та функції Y від власної індуктивності обмотки дроселя L_1 .

На рисунку 3.10 також присутній максимум завадоємісії при значенні індуктивності $L_1 = 2$ мГн. Його наявність пояснюється тим, що індуктивність

обмотки утворює з конденсаторами фільтра синфазної складової послідовний коливальний контур з резонансною частотою, близькою до робочої частоти імпульсного стабілізатора. В даному випадку робоча частота стабілізатора $f_r = 10$ кГц, ємність конденсатора фільтра синфазної складової $C7 = 100$ нФ. Резонансна частота утвореного контура

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L1 \cdot C7}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{2 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-9}}} = 11254 \text{ Гц}$$

На резонансній частоті напруга завади на елементах утвореного контура створює максимальне падіння напруги і процесу фільтрації не відбувається. Отже, при розробці фільтрів потрібно виключити можливість виникнення подібних ситуацій. Це явище також накладає обмеження на вибір номінальних значень елементів фільтра, що треба враховувати в методиках розрахунку.

3.4 Проектування фільтра завад

3.4.1 Конструкція гібридного дроселя

Гібридний здвоєний дросель є найскладнішим основним елементом фільтра. Основою пропонованої конструкції є тороїдальні феромагнітні осердя (рис. 3.11).

На першому осерді намотана обмотка L1. Друга обмотка L2 намотана з використанням обох осердь.

Перевагою використання тороїдальних осердь, в порівнянні з Ш-подібними є низький рівень паразитних магнітних випромінювань, недоліком є неможливість створення дроселя з немагнітним зазором в осерді.

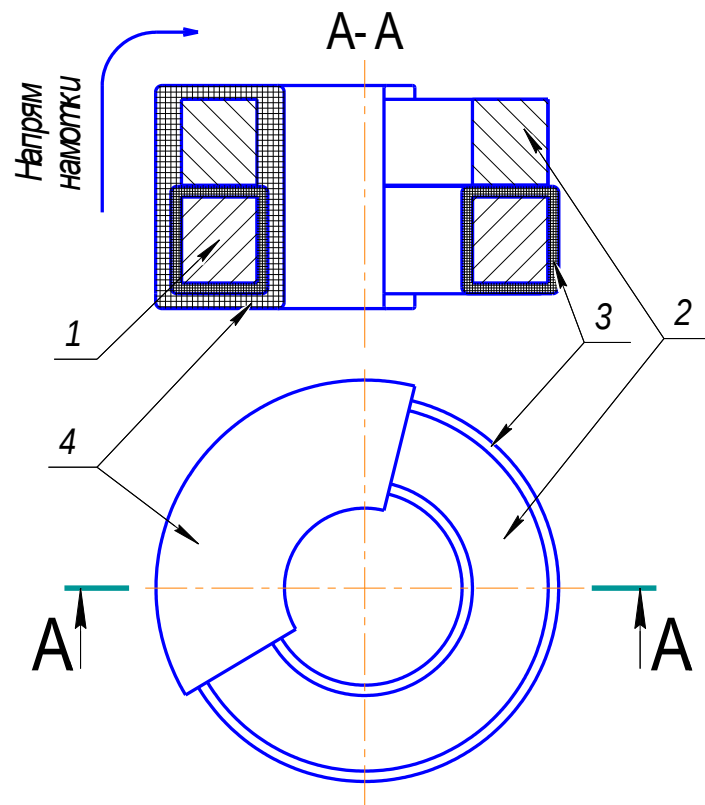


Рисунок 3.11 – Конструкція гібридного зведеного дроселя. 1 – перше осердя, 2 – друге осердя, 3 – обмотка L1, 4 – обмотка L2

Тому рекомендувати таку конструкцію можна переважно для ІДЕ малої та середньої потужності. При використанні даного дроселя в потужних ІДЕ для уникнення насичення осердя під час протікання великих струмів в обмотках необхідно використовувати осердя великих діаметрів, що може бути економічно недоцільно.

Дросель запропонованої конструкції може використовуватись в фільтрах для подавлення синфазної та диференційної складових завади. Дослідження, наведені вище, показали, що при досягненні оптимального коефіцієнта зв'язку між обмотками та при виконанні однієї обмотки більшої індуктивності, в порівнянні з іншою, можна досягти низької завадоємисії без використання додаткових індуктивних елементів. Параметри дроселя можуть корегуватися зміною кількості витків обмоток.

3.4.2 Методика проектування фільтра завад на основі гібридного здвоєного дроселя

Схема проектованого фільтра на основі гібридного здвоєного дроселя показана на рисунку 3.12

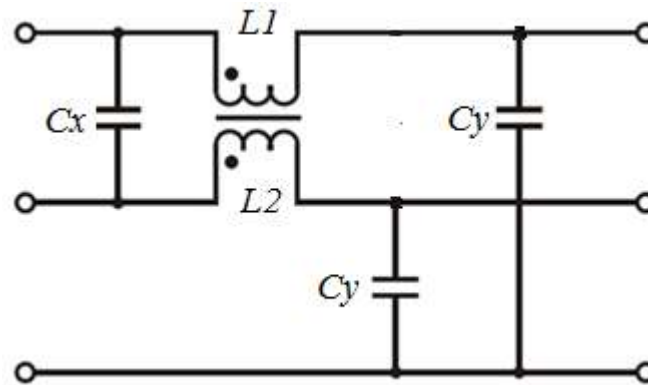


Рисунок 3.12 Схема фільтра завад

Вихідними даними для проектування фільтра мають бути:

1. Загасання на робочій частоті ІДЕ (дБ)
2. Коефіцієнт подавлення синфазної завади (в разях)
3. Коефіцієнт подавлення диференційної завади завади (в разях)

Виходячи з формули для внесеного загасання на робочій частоті ІДЕ

$$S(-\text{дБ}) = 40 \lg \left(\frac{f_z}{f_p} \right),$$

частота зрізу характеристики фільтра:

$$f_z = f_p \cdot 10^{(S/40)},$$

де f_z - частота зрізу характеристики фільтра; f_p - робоча частота джерела живлення.

Значення ємності конденсаторів C_u для подавлення синфазної завади, визначається значенням безпечного струму заземлення ($I_z \max$), значення якого для апаратури загального призначення становить не більш 0,5-2 мА, а для медичної апаратури - не більше 0,1 мА. Звідси максимально допустиму значення ємності

$$C_{u \max} = \frac{I_z \max}{4\pi \cdot f_m \cdot U_m \max},$$

де $I_z \max$ – допустимий струм заземлення, f_m - частота мережі, $U_m \max$ максимальна напруга мережі.

Виходячи з максимального значення ємності C_u , частоти зрізу фільтра, необхідного коефіцієнта подавлення синфазної завади визначається мінімальна індуктивність дроселя, необхідна для подавлення синфазної завади

$$L_{c \min} = \frac{K_{nc}}{8\pi^2 \cdot f_z^2 \cdot C_{u \max}},$$

де K_{nc} - коефіцієнт подавлення синфазної завади

На наступному етапі необхідно задатися взаємною індуктивністю дроселя M , яка може бути обрана в два рази менша за мінімальну індуктивність дроселя, необхідну для подавлення синфазної завади.

$$M \approx \frac{L_{c \min}}{2}. (1)$$

Враховуючи, що для синфазної завади індуктивності обмоток дроселя

$$L_{c1} = L_1 + M, \quad L_{c2} = L_2 + M,$$

можна обрати початкові мінімально необхідні значення індуктивностей L_1 та L_2 .

$$L_1 = L_{c1} - M = \frac{L_{c \min}}{2}, \quad L_2 = L_{c2} - M = \frac{L_{c \min}}{2} \quad (2)$$

Для диференційної складової завади $L_{d1} = L_1 - M$ та $L_{d2} = L_2 - M$. Приймаючи $L_{d1} = L_{d2} = L_d$ визначається мінімальне значення ємностей для подавлення диференційних завад C_x

$$C_{x \min} = \frac{K_{pd}}{8\pi^2 \cdot f_3^2 \cdot L_d},$$

де K_{pd} коефіцієнт подавлення диференційної завади завади

Після розрахунку значень ємностей фільтра на наступному етапі проектування необхідно уточнити значення індуктивностей дроселя та знайти кількість витків обмоток, задавшись розмірами осердь.

Проектування дроселя фільтра завад є ітераційним процесом. Зазвичай для досягнення прийнятного результату доводиться провести 3-4 ітерації.

Обираємо матеріал осердя. На першому кроці віддаємо перевагу матеріалам з великою магнітною проникністю.

Вибираємо типорозмір осердя, користуючись формулою

$$S_{ст} \cdot S_{ок} = \frac{P_r}{2 \cdot B \cdot j \cdot k_c \cdot k_m \cdot f} \quad [13],$$

де k_c, k_m – емпіричні коефіцієнти, які враховують ефективне заповнення площі перетину осердя феромагнетиком та ступінь заповнення вікна осердя міддю. Для фериту $k_c = 1$, $k_m = 0.1 - 0.15$, I – максимальний струм дроселя, j – щільність струму, 4,5 А/мм. P_r – габаритна потужність, f – частота мережі, B – допустиме значення магнітної індукції для обраного матеріалу

Габаритна потужність визначається за формулою

$$P_r = 2\pi f \cdot \left(\frac{(L_1 + L_2)}{2} - M \right) \cdot I^2,$$

де L_1, L_2 – індуктивності обмоток дроселя, M – взаємна індуктивність обмоток дроселя.

Для визначення зв'язку індуктивностей дроселя з його конструктивними параметрами необхідно детальніше розглянути розташування обмоток дроселя та напрями магнітних потоків у магнітопроводах (рисунок 3.13).

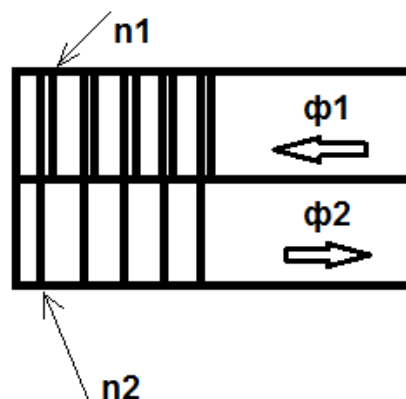


Рисунок 3.13 – Здвоєний дросель фільтру завод. n_1 – кількість витків першої обмотки, n_2 – кількість витків другої обмотки, Φ_1, Φ_2 – магнітні потоки першого та другого осердя відповідно.

В загальному випадку індуктивність визначається за формулою

$$L = \frac{\psi}{I},$$

де $\psi = n \cdot \Phi$ – потокозчеплення, I – струм через обмотку.

Отже,

$$L1 = \frac{n_1 \cdot \Phi1}{I}, \quad L2 = \frac{n2 \cdot \Phi2 - n1 \cdot \Phi1}{I}. \quad (3)$$

За визначенням магнітного потоку

$$\Phi1 = \int B1 dS = B1 \cdot S, \quad \Phi2 = \int B2 dS = B2 \cdot S, \quad (4)$$

де $B1$, $B2$ – індукції в першому та другому осерді, S – площа осердя. (розглядається випадок ідентичних осердь).

Для визначення індукції та магнітного потоку через конструктивні параметри та струм скористаємось законом повного струму.

$$\oint H1 dl = n1 \cdot I - n2 \cdot I, \quad H1 \cdot l = (n1 - n2) \cdot I,$$

$$\int H2 dl = n2 \cdot I, \quad H2 \cdot l = n2 \cdot I,$$

де l – довжина серединної лінії магнітопровода

Виходячи з закону повного струму напруженості магнітних полів в осердях

$$H1 = \frac{(n1-n2) \cdot I}{l}, \quad H2 = \frac{n2 \cdot I}{l}.$$

Магнітні індукції в осердях

$$B1 = \mu\mu_0 H1, \quad B2 = \mu\mu_0 H2$$

$$B1 = \frac{\mu\mu_0(n1-n2) \cdot I}{l}, \quad B2 = \frac{\mu\mu_0 n2 \cdot I}{l} \quad (5)$$

При виборі матеріалу осердя необхідно звертати увагу, щоб значення магнітних індукцій не перевищували певних значень, більше яких настає насичення магнітного матеріалу осердя. Наприклад для фериту НМ2000 $B < 0,34 \text{ Тл}$.

Використовуючи формули (3), (4), (5) знайдемо індуктивності обмоток

$$L1 = \frac{\mu\mu_0(n1^2 - n1 \cdot n2) \cdot S}{l}, \quad (6)$$

$$L2 = \frac{\mu\mu_0(n2^2 + n1n2 - n1^2) \cdot S}{l}, \quad (7)$$

Взаємна індуктивність, з врахуванням коефіцієнта зв'язку

$$M = \sqrt{L1 \cdot L2} \quad (8)$$

Таким чином, можна запропонувати наступну послідовність розрахунку здвоєного гібридного дроселя:

1. Знаючи з формул (1), (2) необхідні значення індуктивностей, використовуючи формули (6), (7) визначається кількість витків обмоток дроселя, шляхом розв'язання системи рівнянь (6), (7) відносно $n1$, $n2$.

2. Перевіряється по формулі (5) значення індукції в магнітопроводах. Якщо ці значення перевищують індукцію насичення, вибирається або більше осердя, або матеріал осердя з більшою індукцією насичення.

3. Перевіряється можливість фізичного розміщення обмоток у вікні магнітопровода. Середня довжина намоточного шару

$$l_{\text{ср}} = \pi \cdot \frac{D - D_{\text{вн}}}{2},$$

де D – внутрішній діаметр осердя, $D_{\text{вн}}$ - допустимий залишковий діаметр внутрішнього отвору.

Кількість витків в одному шарі

$$\varphi_{\text{ш}} = k_{\text{укл}} \cdot \frac{l_{\text{ср}}}{D_2 \cdot n_1 \cdot n_2},$$

де D_2 – діаметр проводу з ізоляцією, $k_{\text{укл}}$ - коефіцієнт укладки, $k_{\text{укл}} = 0,8 - 0,65$ [13].

Кількість шарів

$$N_{\text{ш}} = \frac{n_1 + n_2}{\varphi_{\text{ш}}}$$

Товщина обмоток

$$H = N_{\text{ш}} \cdot D_2$$

Якщо виконується співвідношення

$$H < \frac{D - D_{\text{вн}}}{2},$$

розрахунок дроселя закінчено. Якщо товщина обмоток виявиться занадто великою, необхідно обрати більший магнітопровід і повторити розрахунки.

Після виготовлення спроектованого дроселя необхідно експериментально визначити його частотні характеристики.

3.5 Оцінка ефективності фільтра завад на основі гібридного здвоєного дроселя.

Результати проведених досліджень продемонстрували, що фільтр на основі гібридного дроселя здатний забезпечити такий же рівень подавлення завад, як і фільтр у традиційному виконанні. Оцінка доцільності та ефективності використання гібридного дроселя може бути здійснена шляхом аналізу його масогабаритних характеристик.

Для цього необхідно порівняти площу, яку займають фільтри обох типів (рис. 3.14).

У традиційному виконанні фільтра використовуються:

- Для подавлення синфазної завади – здвоєний дросель PLA10 фірми Murata. Індуктивність $L_s = 7 \text{ мГн}$. Площа посадкового місця $S_1 = 18\text{мм} \times 16\text{мм} = 288 \text{ мм}^2$
- Для подавлення диференційної завади – два дроселі серії 3200 фірми Murata Індуктивність $L_s = 330 \text{ мкГн}$. Площа посадкового місця $S_3 = 20\text{мм} \times 10\text{мм} = 200 \text{ мм}^2$

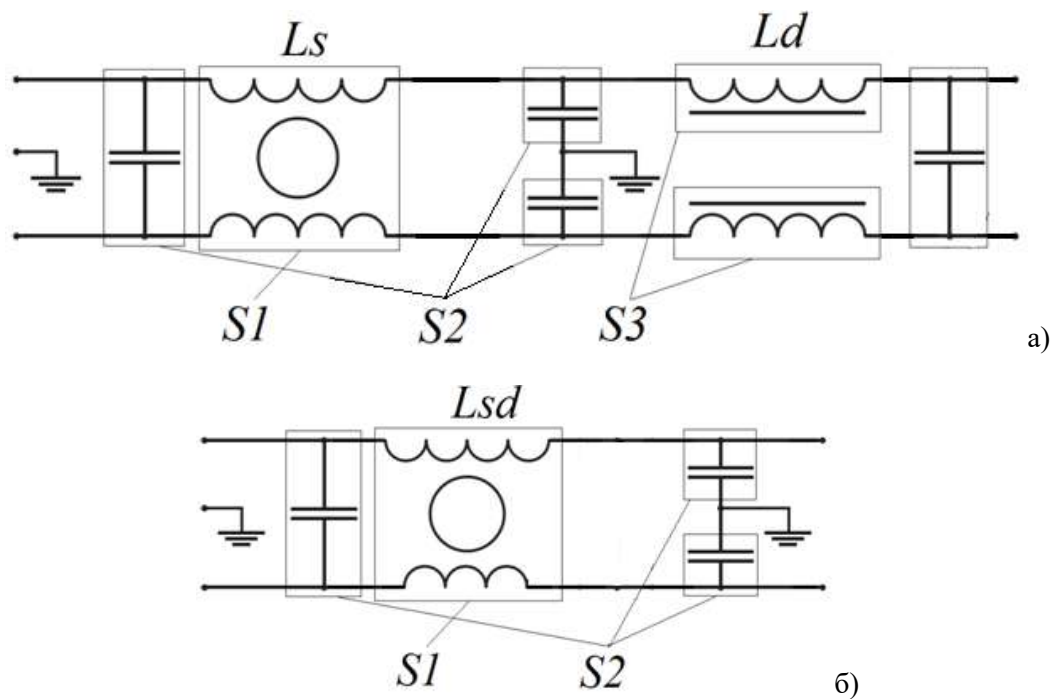


Рисунок 3.14 – Оцінка площі, займаної фільтром у традиційному конструктивному виконанні (а) і фільтром на основі гібридного дроселя (б).

Гібридний дросель для фільтра на рисунку 3.14б з аналогічними параметрами індуктивності може бути виконаний на тороїдальному осерді з зовнішнім діаметром 24 мм та товщиною 6 мм. Площа посадкового місця

$$S_1 = 28 \text{ мм} \times 20 \text{ мм} = 560 \text{ мм}^2$$

В обох фільтрах застосовані однакові конденсатори МКР GLC ємністю 0,22 мкФ з допустимою напругою 300 В. Площа посадкового місця одного конденсатора $S_2 = 23 \text{ мм} \times 5 \text{ мм} = 115 \text{ мм}^2$.

Результати порівняння займаної фільтрами площі наведено в таблиці 3.5

Таблиця 3.5. Порівняння площі, займаної фільтрами.

Параметр	Фільтр у традиційному виконанні	Фільтр на основі гібридного дроселя
Площа індуктивних елементів, мм ²	688	560
Відносне зменшення площі індуктивних елементів, %	-	16
Площа конденсаторів, мм ²	800	600
Загальна площа фільтра, мм ²	1488	1160
Відносне зменшення загальної площі фільтра, %	-	22

Таким чином, при застосуванні гібридного дроселя кількість елементів фільтра зменшується на 43 %, а площа фільтра зменшується на 22 % при збереженні ефективності фільтрації. Отже застосування гібридного зведеного дроселя є доцільним.

3. 6 Висновки

У результаті проведених досліджень були встановлені залежності рівня завадозахисності від паразитних параметрів електромережі, робочої частоти ІДЕ та характеристик дроселя фільтра завад. На основі отриманих результатів визначено, що перспективним напрямом покращення електромагнітної сумісності (ЕМС) ІДЕ є вдосконалення конструкції фільтра завад, зокрема, індуктивного дроселя.

Було запропоновано нову конструкцію зведеного гібридного дроселя та розроблено методику його розрахунку. Ця конструкція відзначається високою ефективністю, оскільки забезпечує досягнення необхідного рівня подавлення синфазної та диференційної складових завади. Крім того, вона має кращі техніко-економічні характеристики, зокрема, займає менше місця, є більш технологічною та придатною для серійного виробництва.

ВИСНОВОК

У ході досліджень було встановлено, що ІДЕ, побудовані на основі підвищувального стабілізатора, мають потенційно вищий рівень кондуктивних завад, які потрапляють в електромережу. Це пов'язано з переривчастим характером вхідного струму, що спричиняє появу низькочастотних гармонік напруги мережі.

Рівень завадоємисії прямо пропорційно залежить від паразитних параметрів мережі електроживлення. При зміні робочої частоти ІДЕ за наявності вхідного фільтра завад рівень диференційної складової завади може змінюватися до 13,5% від початкового значення. Для зменшення завадоємисії рекомендовано застосовувати нижчі робочі частоти.

На основі попередніх досліджень запропоновано відмовитися від традиційного підходу до побудови фільтрів, за якого окремі індуктивні елементи застосовуються для подавлення синфазної та диференційної складових завади. Натомість пропонується використовувати фільтри на основі зведеного гібридного дроселя, який одночасно виконує фільтрацію обох складових кондуктивної завади.

Було виявлено, що існує оптимальне співвідношення параметрів дроселя, зокрема власної та взаємної індуктивності його обмоток, за якого ефективність фільтрації досягає максимуму.

Розроблено ефективну конструкцію зведеного гібридного дроселя та запропоновано інженерну методику розрахунку фільтрів на його основі. Ця конструкція забезпечує не лише необхідний рівень подавлення синфазної та диференційної складових завади, але й має покращені техніко-економічні показники: зменшені габарити, нижчу вартість і вищу технологічність.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 2977-95 Радіозавади. Терміни та визначення
2. ДСТУ ІЕС 60050-161-2003 Словник електротехнічних термінів. Глава 161. Електромагнітна сумісність
3. ДСТУ ІЕС 61000-1-1:2009 Електромагнітна сумісність. Частина 1. Загальні положення. Секція 1. Використання та тлумачення основоположних термінів і визначень понять
4. ДСТУ 3593-97 Сумісність технічних засобів електромагнітна. Джерела електроживлення. Методи випробувань на кондуктивні радіозавади
5. ДСТУ 3639-97 Сумісність технічних засобів електромагнітна. Фільтри протишумів. Загальні технічні умови
6. ДСТУ CISPR 22:2007 Обладнання інформаційних технологій. Характеристики радіозавад. Норми та методи вимірювання.
7. ДСТУ EN 61204-3:2007 Джерела електроживлення низьконапружні з вихідною напругою постійного струму. Частина 3. Електромагнітна сумісність (EN 61204-3:2000, IDT)
8. ІЕС 602040-2: –Semiconductor converters – Uninterruptible power systems (UPS) – Part 2: Electromagnetic compatibility (EMC) requirements (Напівпровідникові перетворювачі. Системи безперебійного живлення (СБЖ). Частина 2: Вимоги до електромагнітної сумісності (ЕМС))
9. Электромагнитная совместимость технических средств. Справочник / Под ред. Кармашева В. С. – М.: 2001.
10. Уильяме Т. EMC (электромагнитная совместимость) для разработчиков продукции. М.: Технологии. 2003.
11. ГОСТ Р 50397-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения.
12. ГОСТ 23875-88. Качество электрической энергии. Термины и определения.

13. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
14. Гурвич И. Защита ЭВМ от внешних помех. Энергоатомиздат. 1984.
15. Дмитриев С. Международные стандарты электромагнитной совместимости электронной аппаратуры // Электронные компоненты. 2000. № 1.
16. ГОСТ Р 51527 — 99 (МЭК 60478-3-89). Совместимость технических средств электромагнитная. Стабилизированные источники постоянного тока. Кондуктивные электромагнитные помехи. Нормы и методы испытаний.
17. Эраносян С, Ланцов В. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания // Силовая электроника. 2006. №2.
18. Мкртчян Ж. Основы построения устройств электропитания ЭВМ. М.: Радио и связь. 1990.
19. Векслер Г., Недочетов В., Пилинский В. и др. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания. Киев: Техника. 1990.
20. Варне Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами. М: Мир. 1990.

Технічне завдання

1. Підстава для виконання роботи

Завдання на магістерську дисертацію, видане прикладної радіоелектроніки.

2. Мета і призначення роботи

Постійно зростаюча кількість радіоелектронних засобів обумовлює ускладнення електромагнітної обстановки. З одного боку з'являється більше РЕЗ, потенційно чутливих до електромагнітних завад, з іншого – збільшується кількість джерел завад. Одним з таких джерел завад є імпульсні джерела вторинного електроживлення (ІДВЕ) (імпульсні стабілізатори, інвертори, конвертори, системи безперебійного живлення), якими оснащено значну частину РЕЗ. Завади від імпульсних джерел живлення можуть поширюватися кондуктивним і електромагнітним шляхом (випромінювані завади). При цьому перенесення завад кондуктивним шляхом, через загальний імпеданс мережі живлення є основним. Рівні кондуктивних завад, що надходять в мережу живлення, є жорстко нормовані міжнародними стандартами, що підкреслює важливість проблеми. Основним заходом по боротьбі з кондуктивними завадами є фільтрація. Отже метою роботи є дослідження питань завадоємисії в мережу живлення та питань, пов'язаних з фільтрацією кондуктивних завад. Зокрема необхідно:

1. Дослідити вплив паразитних параметрів мережі на рівень кондуктивних завад для різних типів імпульсних стабілізаторів.
2. Дослідити залежність завадо емисії від робочої частоти стабілізатора
3. Дослідити вплив конструктивних параметрів фільтрів на рівень кондуктивних завад для різних типів імпульсних стабілізаторів

4. Запропонувати покращену конструкцію фільтра завад та методику його розрахунку

3. Вихідні дані для проведення роботи

ДСТУ 3593-97 Сумісність технічних засобів електромагнітна. Джерела електроживлення. Методи випробувань на кондуктивні радіозавади

ДСТУ 3639-97 Сумісність технічних засобів електромагнітна. Фільтри протизавадні. Загальні технічні умови

ДСТУ CISPR 22:2007 Обладнання інформаційних технологій. Характеристики радіозавад. Норми та методи вимірювання.

ДСТУ EN 61204-3:2007 Джерела електроживлення низьконапругні з вихідною напругою постійного струму. Частина 3. Електромагнітна сумісність (EN 61204-3:2000, IDT)

IEC 602040-2: –Semiconductor converters – Uninterruptible power systems (UPS) – Part 2: Electromagnetic compatibility (EMC) requirements (Напівпровідникові перетворювачі. Системи безперебійного живлення (СБЖ). Частина 2: Вимоги до електромагнітної сумісності (EMC))

4. Вимоги до виконання роботи

Дослідження проводиться за допомогою моделей, створених за допомогою пакету програм Matlab Simulink

5. Етапи НДР і терміни їх виконання

1. Підбір джерел. Аналітичний огляд
2. Розроблення технічного завдання
3. Моделювання, аналіз отриманих результатів
4. Представлення магістерської дисертації

6. Очікувані результати та порядок реалізації роботи

Результатом виконання роботи мають бути залежності коефіцієнта гармонік напруги на вході ІДВЕ від паразитного опору та індуктивності

мережі, від конструктивних параметрів фільтра. Залежність коефіцієнта потужності на виході ІДВЕ від конструктивних параметрів фільтра. Необхідно сформулювати рекомендації щодо застосування різних типів імпульсних випрямлячів та рекомендації щодо проектування фільтрів кондуктивних завад.

Результати виконання роботи можуть бути реалізовані наступними способами:

1. продовженням досліджень шляхом виконання нових НДР,
2. використанням результатів досліджень для вдосконалення і модернізації існуючих ІДВЕ.
3. виданням техніко-економічного обґрунтування щодо створення нових фільтрів завад.

7. Матеріали, які подають під час закінчення роботи та її етапів

Під час закінчення роботи подається звіт.

8. Порядок приймання роботи

Робота приймається у відповідності з «Положенням про державну атестацію студентів НТУУ «КПІ»

9. Вимоги до розроблення документації

Документація має відповідати ДСТУ 3008-95, ДСТУ 3973-2000.

Програма обробки результатів досліджень

Матриця плану повного факторного експерименту 2^3 , позначена змінною X , створюється функцією *fullfact*, де задається кількість факторів та кількість рівнів зміни факторів.

$X := \text{fullfact}(2, 3) =$	["Run" "Block" "A" "B"]			
	1	1	0	0
	2	1	1	0
	3	1	2	0
	4	1	0	1
	5	1	1	1
	6	1	2	1
	7	1	0	2
	8	1	1	2
	9	1	2	2

Змінній $Vals$ присвоєно значення факторів, які використовуються в експерименті. L – власна індуктивність обмоток дроселя (мГн),
 Lm – взаємна індуктивність обмоток дроселя (мГн).

$Vals :=$	["L" 3.1 5.1 7.1]			
	["Lm" 1 2 3]			

Матриця плану експерименту 2^3 з підставленими значеннями факторів

$D := \text{doelabel}(X, Vals) =$	["Run" "Block" "L" "Lm"]			
	1	1	3.1	1
	2	1	5.1	1
	3	1	7.1	1
	4	1	3.1	2
	5	1	5.1	2
	6	1	7.1	2
	7	1	3.1	3
	8	1	5.1	3
	9	1	7.1	3

Реакції, отримані за результатами моделювання в середовищі Simulink, записані у вигляді векторів, де кожен рядок відповідає результатам, отриманим при значенні вхідних факторів з відповідного рядка матриці плану експерименту. K_g - коефіцієнт гармонік напруги мережі, us – напруга синфазної складової завади.

$$Kg := \begin{bmatrix} 1.62 \\ 1.42 \\ 1.24 \\ 1.80 \\ 1.53 \\ 1.33 \\ 2.30 \\ 1.66 \\ 1.42 \end{bmatrix} \quad us := \begin{bmatrix} 0.445 \\ 0.050 \\ 0.027 \\ 0.089 \\ 0.036 \\ 0.022 \\ 0.052 \\ 0.028 \\ 0.019 \end{bmatrix}$$

Розрахунок за експериментальними даними значень функції оцінки рівня завад

$$Y := 0.5 \cdot \frac{Kg}{2.3} + 0.5 \cdot \frac{us}{0.445} = \begin{bmatrix} 0.852 \\ 0.365 \\ 0.3 \\ 0.491 \\ 0.373 \\ 0.314 \\ 0.558 \\ 0.392 \\ 0.33 \end{bmatrix}$$

Розрахунок коефіцієнтів регресії для полінома другого ступеня

	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"
polyfitc(X, Y, 2) =	"Intercept"	0.779	0.087	0.502	1.056	NaN
	"A"	-0.436	0.151	-0.915	0.044	14.5
	"B"	-0.267	0.151	-0.747	0.212	14.5
	"AB"	0.081	0.048	-0.073	0.235	4
	"AA"	0.098	0.069	-0.121	0.316	13
	"BB"	0.074	0.069	-0.145	0.292	13

$$c := \text{polyfitc}(X, Y, 2)^{(1)}$$

Апроксимація функції оцінки рівня завад

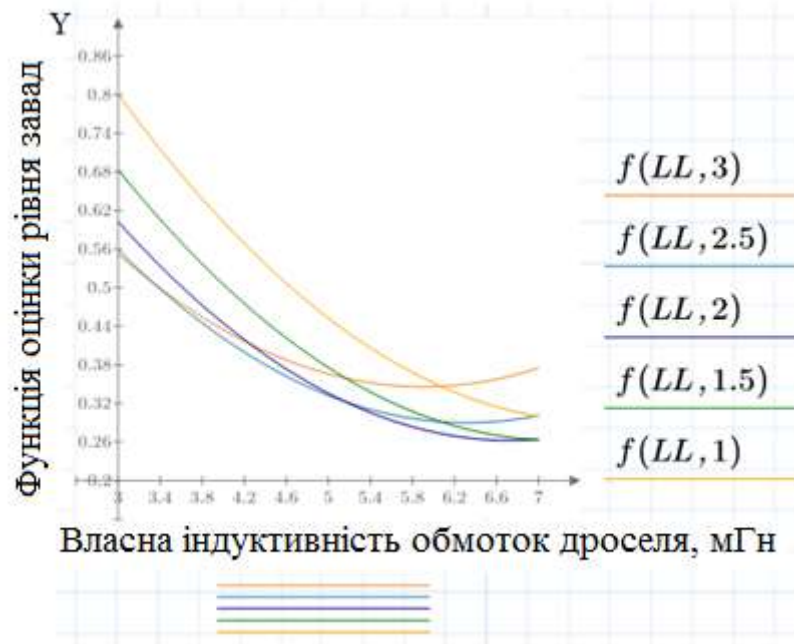
$$\text{yield}(A, B) := c_1 + c_2 \cdot A + c_3 \cdot B + c_4 \cdot A \cdot B + c_5 \cdot A^2 + c_6 \cdot B^2$$

$$\text{Yield} := \text{polyfit}(D, Y, 2)$$

Yield – назва апроксимованої функції, polyfit – функція, що розраховує за матрицею плану експерименту та результатами експерименту коефіцієнти полінома.

Побудова функції оцінки рівня завад при фіксованих значеннях взаємної індуктивності обмоток дроселя

$$f(LL, Lm) := \text{Yield} \left(\begin{bmatrix} LL \\ Lm \end{bmatrix} \right)$$



Побудова функції оцінки рівня завад при фіксованих власної індуктивності обмоток дроселя

