

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ,
ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Кафедра електричного транспорту

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Іван РОЗІНКОВ

гр. ЕТ 2022-1

Керівник:

Анатолій КУЗНЕЦОВ

доцент, к.т.н.


Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра електричного транспорту
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ

 Микола ХВОРОСТ
_____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Розінков Іван Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема роботи: Дослідження електромагнітної сумісності в системах електромобільного транспорту**

кваліфікаційної роботи Кузнецов Анатолій Іванович, доцент, к.т.н., доцент, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від 22.05.2026 №440-03

2. Строк подання бакалаврської кваліфікаційної роботи 15.06.2026 р.




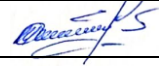
3. **Вихідні дані до бакалаврської роботи** Матеріали переддипломної практики, дані по надійності та працездатності основних вузлів електротранспорту, літературні джерела з експлуатації, обслуговуванню та ремонту електротранспорту.

4. **Зміст бакалаврської кваліфікаційної роботи :**

1. Аналіз проблеми електромагнітної сумісності в електромобільному транспорті.
2. Моделювання та аналіз електромагнітних завад.
3. Розробка методів забезпечення електромагнітної сумісності.
4. Охорона праці.

5. **Перелік графічного матеріалу:** Актуальність, мета та задачі дослідження. Основні джерела електромагнітних завад в електромобілі. Математичне представлення електромагнітних завад. Моделювання електромагнітних процесів у MATLAB/Simulink. Спектральний аналіз електромагнітних завад. Розробка та розрахунок ЕМІ-фільтра. Оцінка ефективності запропонованих рішень. Охорона праці та електробезпека. Висновки

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Анатолій КУЗНЕЦОВ, доцент		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інженер		
Нормоконтроль	Вячеслав ШАВКУН, доцент		

7. Дата видачі завдання 11.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан питання	11.05 – 23.05.2026	
2	Розділи 1, 2	18.05 – 30.05.2026	
3	Розділи 3, 4	25.05 – 06.06.2026	
4	Охорона праці та БНС	01.06 – 13.06.2026	
5	Оформлення паперового та електронного варіантів роботи	08.06 – 13.06.2026	
6	Підготовка доповіді та презентації	08.06 – 13.06.2026	

Здобувач



(підпис)

Іван РОЗІНКОВ

(ім'я, прізвище)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи



(підпис)

Анатолій КУЗНЕЦОВ

(ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено електромагнітну сумісність систем електромобільного транспорту. Актуальність теми зумовлена широким застосуванням силової електроніки та імпульсних перетворювачів, які є джерелами електромагнітних завад і можуть негативно впливати на роботу електронних систем транспортного засобу.

У роботі виконано аналіз сучасних досліджень і нормативної бази у сфері електромагнітної сумісності. Визначено основні джерела завад в електромобілях, зокрема інвертори, DC/DC перетворювачі та системи заряджання, а також розглянуто механізми їх поширення та вплив на системи керування і цифрові мережі. Розроблено імітаційну модель у середовищі MATLAB/Simulink, що дозволяє досліджувати процеси формування та фільтрації електромагнітних завад. На основі моделювання визначено характер впливу завад у різних режимах роботи та встановлено критичні частотні діапазони.

Запропоновано методи зниження електромагнітних завад, зокрема застосування LC- та ЕМІ-фільтрів, екранування та оптимізацію топології електричних з'єднань. Результати моделювання підтвердили ефективність комбінованої фільтрації та суттєве зниження рівня високочастотних завад.

У розділі з охорони праці проаналізовано основні небезпечні фактори та обґрунтовано заходи щодо забезпечення електробезпеки, пожежної безпеки та належних умов праці.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, електромобіль, електромагнітні завади, ЕМІ-фільтр, LC-фільтр, MATLAB/Simulink, електропривід.

Пояснювальна записка містить:

сторінок – 64, таблиць – 3, рисунків – 18, графічна частина складається з 11 аркушів презентаційного матеріалу.

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В ЕЛЕКТРОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ.....	9
1.1 Поняття електромагнітної сумісності та її значення	9
1.2 Основні джерела електромагнітних завад.....	10
1.3 Канали поширення завад.....	11
1.4 Вплив ЕМЗ на системи електромобіля.....	12
1.5 Нормативна база та стандарти ЕМС	13
1.6 Критичний аналіз сучасних досліджень.....	15
1.7 Визначення задачі дослідження	16
2 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД.....	19
2.1 Постановка задачі дослідження	19
2.2 Математичне представлення джерел завад.....	19
2.3 Моделювання електромагнітних процесів.....	22
2.4 Аналіз каналів поширення	23
2.5 Оцінка рівня електромагнітних завад.....	25
2.6 Верифікація результатів.....	26
Висновки до розділу 2	28
3 РОЗРОБКА МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ.....	29
3.1 Загальні принципи забезпечення ЕМС.....	29
3.2 Розробка схем фільтрації	30
3.2.1 Розрахунок ЕМІ-фільтра для системи електроприводу електромобіля	31

3.3 Екранування та заземлення.....	38
3.4 Оптимізація топології системи.....	40
3.5 Алгоритмічні методи зниження завад	40
3.6 Оцінка ефективності запропонованих рішень	42
Висновок до розділу 3.....	47
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	48
4.1 Вступ	48
4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів.....	48
4.2 Нормування електромагнітних полів	49
4.3 Засоби захисту персоналу	50
4.4 Електробезпека.....	50
4.5 Пожежна безпека	53
4.6 Ергономіка та умови праці.....	54
Висновки до розділу 4	57
ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60

ВСТУП

Науково-технічна проблема, яка розглядається у даній роботі, полягає у необхідності підвищення рівня електромагнітної сумісності систем електромобільного транспорту шляхом комплексного аналізу джерел електромагнітних завад, каналів їх поширення та впливу на функціонування електронних систем.

У зв'язку з цим метою даного дослідження є дослідження процесів формування та поширення електромагнітних завад у системах електромобільного транспорту та розробка підходів до підвищення електромагнітної сумісності на основі їх моделювання та аналізу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

- виконати аналіз сучасного стану проблеми електромагнітної сумісності в електромобільному транспорті та визначити основні джерела електромагнітних завад;
- дослідити канали поширення електромагнітних завад у силових і сигнальних колах електромобіля;
- розробити математичну модель формування електромагнітних завад у системі електроприводу електромобіля;
- провести моделювання електромагнітних процесів з урахуванням паразитних параметрів та режимів роботи силової електроніки;
- оцінити рівень електромагнітних завад та їх відповідність нормативним вимогам (ISO 11452; CISPR 25);
- розробити рекомендації щодо зниження рівня електромагнітних завад у системах електромобільного транспорту;
- виконати порівняльний аналіз ефективності запропонованих рішень.

Об'єктом дослідження є електромагнітні процеси в системах електромобільного транспорту.

Предметом дослідження є закономірності формування, поширення та пригнічення електромагнітних завад у силових і інформаційних колах електромобіля.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до аналізу електромагнітної сумісності, який передбачає одночасний розгляд джерел завад, каналів їх поширення та взаємодії підсистем електромобіля з урахуванням реальних експлуатаційних умов.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при проектуванні електромобільних систем для підвищення їх надійності, електромагнітної сумісності та безпеки функціонування.

1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В ЕЛЕКТРОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ

1.1 Поняття електромагнітної сумісності та її значення

Електромагнітна сумісність є однією з базових умов надійної роботи сучасного електромобільного транспорту, оскільки сама архітектура такого транспорту побудована на поєднанні силової електроніки, високовольтних кіл, цифрових систем керування, мереж обміну даними та численних датчиків. За підходом ІЕС електромагнітна сумісність розглядається як здатність електричних і електронних систем працювати коректно в електромагнітному середовищі без створення неприйнятних завад для іншого обладнання. Для електромобіля це означає, що тяговий інвертор, DC/DC перетворювач, бортовий зарядний пристрій, батарейна система, CAN-мережа та вимірювальні канали повинні одночасно функціонувати без взаємного пригнічення або спотворення сигналів. Саме тому ЕМС у транспорті вже не можна розглядати як допоміжну вимогу: вона є частиною функціональної надійності, безпеки руху та стійкості електронної архітектури транспортного засобу. [1 – 3].

На відміну від традиційного автомобіля, в електромобільному транспорті джерела електромагнітних завад мають більш концентрований і енергетично насичений характер. Це пов'язано з широким використанням швидкодіючих напівпровідникових ключів, високих значень струмів, крутих фронтів напруги й струму, а також із постійною присутністю імпульсних режимів перетворення енергії. У тягових системах саме високі значення dv/dt і di/dt , характерні для IGBT- та MOSFET-перетворювачів, формують основу для появи як провідних, так і випромінюваних завад. Тобто проблема ЕМС тут закладена не випадково, а безпосередньо впливає з принципу роботи сучасного електропривода та зарядної інфраструктури [4 – 6].

Отже, значення ЕМС для електромобільного транспорту полягає не лише в дотриманні стандартів, а й у забезпеченні стабільної роботи всіх підсистем у межах єдиного електромагнітного середовища. Якщо для звичайного силового обладнання завади часто сприймаються як побічний технічний ефект, то для електромобіля вони перетворюються на системну проблему, здатну одночасно впливати на керування, зв'язок, заряджання, вимірювання та електробезпеку [1, 7].

1.2 Основні джерела електромагнітних завад

Ключовим джерелом електромагнітних завад в електромобілі є інвертор тягового приводу. Саме він перетворює енергію акумулятора у змінну напругу для живлення електродвигуна, працюючи в режимі широтно-імпульсної модуляції. Через швидкі перемикання силових ключів інвертор генерує значні синфазні та диференційні завади, які далі поширюються як по силових кабелях, так і через паразитні ємності та індуктивності конструкції. У сучасних інтегрованих приводних модулях проблема ще посилюється, оскільки в одному корпусі поєднуються інвертор, двигун, редуктор та допоміжні вузли, а це ущільнює джерела випромінювання і канали наведення [5, 8].

Другим важливим джерелом є DC/DC перетворювачі, які забезпечують живлення низьковольтних кіл від високовольтної батареї. Хоч їхня потужність зазвичай менша за тяговий контур, саме вони часто розміщені близько до електронних блоків керування, датчиків і комунікаційних шин. Через це навіть відносно локальні завади від DC/DC-перетворювача можуть виявитися критичними для вимірювальних або цифрових кіл. Аналогічно бортові зарядні пристрої, особливо на базі швидкодіючих GaN або SiC ключів, формують помітний спектр завад, який проявляється як у самому транспортному засобі, так і на межі з мережею живлення [9 – 11].

Окрему роль відіграють кабельні мережі та комутаційні процеси. Високовольтні кабелі, точки з'єднання, контури заземлення і навіть геометрія прокладання джгутів у транспортному засобі працюють не як пасивні елементи, а як активні учасники поширення електромагнітних завад. У дослідженнях показано, що розподілені параметри кабелів і паразитні елементи істотно змінюють картину провідних ЕМІ-викидів та можуть породжувати резонансні піки в широкому частотному діапазоні. Це означає, що джерелом проблеми є не лише силовий ключ як такий, а вся електромагнітна структура приводу [4, 12].

Таким чином, до основних джерел ЕМЗ у системах електромобільного транспорту доцільно відносити інвертори тягового приводу, DC/DC перетворювачі, бортові та зовнішні зарядні системи, високовольтні кабельні мережі та швидкодіючі силові ключі IGBT/MOSFET. Їх об'єднує те, що кожне з цих джерел пов'язане з імпульсним перетворенням енергії, а отже неминуче створює електромагнітні процеси, які мають бути враховані на системному рівні [7,13].

1.3 Канали поширення завад

Електромагнітні завади в електромобілі поширюються двома головними шляхами: провідним і випромінюваним. Провідні завади передаються через силові та сигнальні лінії, шини живлення, заземлення та міжблочні з'єднання. У таких випадках завада буквально «йде по проводу», накладаючись на корисний сигнал або на напругу живлення. Для тягових і зарядних систем саме провідний канал є одним із найкритичніших, бо він безпосередньо пов'язує силову електроніку з контролерами, батареєю, датчиками та допоміжними перетворювачами [13, 14].

Випромінювані завади формуються тоді, коли елементи конструкції, кабелі або контури струму починають діяти як ненавмисні антени. У

багатокомпонентних електроприводних системах радіочастотне випромінювання часто виникає як наслідок синфазних струмів, що формуються внаслідок комутації силових ключів. Тому навіть за задовільних показників провідної ЕМС транспортний засіб може демонструвати незадовільну радіочастотну поведінку на рівні окремих модулів або всього виробу. Саме на це орієнтуються стандарти на кшталт CISPR 25, які визначають межі та методи вимірювання радіозавад для захисту бортових приймачів [5, 15].

Особливої уваги потребують ємнісні та індуктивні зв'язки, а також паразитні параметри конструкції. У реальному електромобілі жоден кабель, друкована плата або корпус не є ідеальними. Між провідниками існують паразитні ємності, в контурах струму – паразитні індуктивності, а в місцях монтажу – неоднорідності, які змінюють імпеданс шляху поширення завади. Саме ці «непомітні» параметри часто пояснюють, чому система, яка формально правильна за схемою, виявляється проблемною під час ЕМС-випробувань. У працях з моделювання провідних ЕМІ у приводах і зарядних системах підкреслюється, що без урахування паразитних елементів неможливо коректно передбачити ані спектр завад, ані резонансні піки, ані ефективність фільтрації [4, 11, 16].

1.4 Вплив ЕМЗ на системи електромобіля

Наявність електромагнітних завад у транспортному засобі безпосередньо впливає на працездатність систем керування. Найвразливішими виявляються електронні блоки, які працюють із малими рівнями сигналів або в жорстких часових межах. Якщо завада накладається на опорний або вимірювальний сигнал, система керування отримує викривлену картину стану об'єкта і може формувати неправильний керуючий вплив. Для тягового приводу це означає ризик нестабільності регулювання, для

батареїної системи – ризик помилок діагностики, а для зарядного обладнання – ризик некоректної взаємодії з мережею або захисною автоматикою [17, 18].

Окремим проявом є помилки в роботі датчиків і вимірювальних каналів. У системах електромобіля широко використовуються струмові, напругові, температурні, магнітні та положеневі датчики, а тому будь-які паразитні наведення можуть викликати спотворення вимірюваної величини. Для сучасних систем, де алгоритми керування покладаються на точні цифрові оцінки стану, навіть короточасне викривлення даних здатне призвести до каскадного погіршення роботи. Показово, що в новіших роботах із надійності автомобільної електроніки в EV прямо підкреслюється негативний вплив ЕМІ на точність датчиків, шини зв'язку та ECU [19, 20].

Не менш важливими є збої цифрових систем, передусім CAN-шини та пов'язаних із нею вузлів. Сама ідея розподіленого керування в електромобілі передбачає постійний обмін даними між контролерами, і тому стійкість комунікаційного середовища стає елементом загальної електромагнітної сумісності. Втрата повідомлень, зміна часових параметрів або порушення цілісності сигналу вже не є просто «незручністю» – у критичних випадках це переходить у площину функціональної безпеки. Стандарти компонентних випробувань ISO 11452 саме тому й орієнтовані на перевірку імунітету електронних компонентів автомобіля до вузькосмугового випромінюваного електромагнітного впливу [21].

Отже, вплив ЕМЗ на електромобільний транспорт слід оцінювати не як ізольоване погіршення електромагнітних показників, а як фактор ризику для коректності керування, достовірності вимірювань, цифрового обміну та безпеки руху загалом. Саме це пояснює, чому проблема ЕМС у транспорті сьогодні розглядається на рівні повноцінного системного проектування [21, 22].

1.5 Нормативна база та стандарти ЕМС

Нормативна база в галузі EMC для автомобільної та електромобільної техніки спирається насамперед на документи IEC, ISO та CISPR. IEC формує загальні рамки електромагнітної сумісності, а також базові й загальні стандарти, які визначають підходи до випробувань на емісію та імунітет. ISO розробляє спеціалізовані стандарти для дорожніх транспортних засобів, включаючи компонентні методи випробувань. CISPR, як система стандартів у структурі IEC, встановлює вимоги до вимірювання радіозавад і захисту бортових приймачів. У сукупності ці документи формують нормативне поле, в якому електромобіль повинен не лише ефективно працювати, а й бути електромагнітно «керованим» виробом [1, 17, 22].

Особливе місце займає серія ISO 11452, яка стосується компонентних випробувань на стійкість до електричних збурень від вузькосмугової випромінюваної електромагнітної енергії. Важливо, що цей стандарт прямо охоплює компоненти пасажирських і комерційних транспортних засобів незалежно від типу силової установки, тобто він придатний і для електромобільного транспорту. З практичної точки зору ISO 11452 важливий тим, що переводить розмову про EMC із рівня загальних міркувань на рівень стандартизованих процедур перевірки імунітету компонентів [21].

Для оцінювання радіозавад критично важливим є стандарт CISPR 25. У чинній редакції 2021 року він встановлює межі та процедури вимірювання радіозбурень у діапазоні від 150 кГц до 5925 МГц для транспортних засобів, човнів, двигунів внутрішнього згорання та електричних/електронних компонентів, призначених для використання в транспорті. Його практична цінність полягає в тому, що він орієнтований саме на захист бортових приймачів і тим самим безпосередньо пов'язаний з реальною експлуатаційною сумісністю електроніки всередині транспортного засобу [15].

Отже, вимоги до автомобільної електроніки в частині EMC ґрунтуються на двох ключових напрямках: обмеження емісії завад та забезпечення достатнього рівня імунітету. Для електромобіля це означає, що кожен

критичний компонент повинен бути перевірений не лише на виконання своєї основної функції, а й на здатність працювати в умовах складного електромагнітного оточення [15, 17, 21, 22]

1.6 Критичний аналіз сучасних досліджень

Сучасні дослідження з ЕМС в електромобільному транспорті загалом концентруються навколо трьох груп рішень: фільтрація, екранування та оптимізація топології силових і сигнальних кіл. У працях, присвячених провідним ЕМІ у приводах і зарядних системах, показано, що правильно спроектовані ДМ/СМ-фільтри здатні істотно знизити рівень завад. Водночас майже всі автори підкреслюють, що ефективність фільтра залежить від реального імпедансного середовища, паразитних зв'язків та режимів комутації, а отже один лише вибір «сильнішого» фільтра не гарантує результату [13, 14].

Другий поширений напрям пов'язаний з конструктивними заходами: екрануванням, мінімізацією контурів струму, оптимізацією трасування та зменшенням синфазної напруги. Оглядові праці з інверторних топологій та методів модуляції показують, що джерело ЕМЗ доцільно пригнічувати ще на етапі формування комутаційних процесів, а не тільки «ловити» вже згенеровану заваду на виході. Саме тому дедалі більшої ваги набувають рішення, у яких питання ЕМС поєднуються з вибором топології перетворювача, алгоритму ШІМ та конструкції модуля [8, 23]

Разом із тим аналіз джерел показує і суттєві обмеження сучасних підходів. По-перше, значна частина робіт розглядає проблему локально: або лише інвертор, або лише зарядний пристрій, або лише провідну емісію, не охоплюючи всю електромагнітну взаємодію підсистем. По-друге, у багатьох дослідженнях ефективність рішень доводиться на спрощених моделях, де паразитні параметри та конструктивні особливості враховано частково. По-

третє, часто відсутня інтеграція між етапами схемного, конструктивного та алгоритмічного проєктування, через що засоби забезпечення ЕМС застосовуються постфактум, коли архітектурні джерела проблем уже закладені в систему [3, 12, 13].

Отже, сучасний стан досліджень демонструє достатньо великий набір технічних інструментів для зниження ЕМЗ, однак не усуває головної проблеми – фрагментарності. Найбільш перспективним видається комплексний підхід, у якому ЕМС враховується не як завершальний етап перевірки, а як наскрізний критерій під час вибору топології, елементної бази, параметрів комутації, трасування кабелів, фільтрації та архітектури керування. Саме ця обставина і формує наукову та практичну доцільність подальшого дослідження [1, 8, 13].

1.7 Визначення задачі дослідження

Проведений аналіз проблеми електромагнітної сумісності в системах електромобільного транспорту показує, що, незважаючи на значну кількість наукових досліджень і наявність нормативної бази, питання забезпечення ЕМС залишається складним і багатофакторним. Це зумовлено тим, що електромагнітні завади формуються одночасно в кількох підсистемах – інверторах, перетворювачах, зарядних пристроях, кабельних мережах – і поширюються різними каналами, взаємодіючи між собою. У результаті виникає ситуація, коли локальне усунення завад не забезпечує загальної електромагнітної сумісності системи.

Аналіз сучасних публікацій показує, що більшість досліджень зосереджені або на окремих джерелах завад (інвертори, зарядні системи), або на окремих методах їх пригнічення (фільтрація, екранування, оптимізація топології), без урахування комплексної взаємодії елементів електромобіля як єдиної електромагнітної системи [8, 13,].

Крім того, існує розрив між теоретичними моделями електромагнітних процесів і реальними умовами експлуатації електромобілів. У багатьох роботах моделювання виконується з обмеженим урахуванням паразитних параметрів, геометрії кабельних трас та конструктивних особливостей, що призводить до відмінностей між розрахунковими та експериментальними результатами [4, 12].

Таким чином, науково-технічна проблема, яка розглядається у даній роботі, полягає у необхідності підвищення рівня електромагнітної сумісності систем електромобільного транспорту шляхом комплексного аналізу джерел електромагнітних завад, каналів їх поширення та впливу на функціонування електронних систем.

У зв'язку з цим метою даного дослідження є дослідження процесів формування та поширення електромагнітних завад у системах електромобільного транспорту та розробка підходів до підвищення електромагнітної сумісності на основі їх моделювання та аналізу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

- виконати аналіз сучасного стану проблеми електромагнітної сумісності в електромобільному транспорті та визначити основні джерела електромагнітних завад;
- дослідити канали поширення електромагнітних завад у силових і сигнальних колах електромобіля;
- розробити математичну модель формування електромагнітних завад у системі електроприводу електромобіля;
- провести моделювання електромагнітних процесів з урахуванням паразитних параметрів та режимів роботи силової електроніки;
- оцінити рівень електромагнітних завад та їх відповідність нормативним вимогам (ISO 11452; CISPR 25);
- розробити рекомендації щодо зниження рівня електромагнітних завад у системах електромобільного транспорту;

– виконати порівняльний аналіз ефективності запропонованих рішень.

Об'єктом дослідження є електромагнітні процеси в системах електромобільного транспорту.

Предметом дослідження є закономірності формування, поширення та пригнічення електромагнітних завад у силових і інформаційних колах електромобіля.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до аналізу електромагнітної сумісності, який передбачає одночасний розгляд джерел завад, каналів їх поширення та взаємодії підсистем електромобіля з урахуванням реальних експлуатаційних умов.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при проектуванні електромобільних систем для підвищення їх надійності, електромагнітної сумісності та безпеки функціонування.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД

2.1 Постановка задачі дослідження

Об'єктом дослідження обрано систему електроприводу електромобіля, що включає тяговий інвертор, електродвигун, DC/DC-перетворювачі та бортову мережу. Такий вибір зумовлений тим, що саме електропривод є основним джерелом електромагнітних завад у транспортному засобі через наявність високочастотних комутаційних процесів і значних струмових навантажень [4, 9].

Метою моделювання є визначення рівнів електромагнітних завад, що виникають у системі, їх спектральних характеристик та умов, за яких відбувається перевищення допустимих нормативних значень.

Критерії електромагнітної сумісності формуються на основі вимог стандартів, зокрема ISO 11452, які визначають допустимі рівні випромінюваних і провідних завад для автомобільних компонентів [2].

До основних вхідних параметрів моделі належать напруга живлення та струми електроприводу; частота та алгоритм комутації інвертора; параметри силових елементів (IGBT/MOSFET); паразитні ємності та індуктивності; параметри кабельних з'єднань.

Таким чином, задача дослідження полягає у побудові моделі електромагнітних процесів, яка дозволяє оцінити формування, поширення та рівень електромагнітних завад у системі електроприводу.

2.2 Математичне представлення джерел завад

Джерелом електромагнітних завад у системі електроприводу є процеси перемикання силових ключів інвертора. Ці процеси супроводжуються

високими значеннями швидкості зміни напруги та струму, що призводить до формування широкого спектра гармонічних складових.

Для аналізу завад доцільно розділити їх на диференційні та синфазні. Диференційні завади пов'язані з різницею потенціалів між провідниками, тоді як синфазні виникають відносно корпусу або заземлення.

Миттєві значення струмів у лініях живлення можуть бути представлені у вигляді:

$$i_{DM} = \frac{i_+ - i_-}{2}, \quad i_{CM} = \frac{i_+ + i_-}{2}. \quad (2.1)$$

Аналогічно для напруг:

$$u_{DM} = u_+ - u_-, \quad u_{CM} = \frac{u_+ + u_-}{2}. \quad (2.2)$$

Для трифазного інвертора синфазна напруга визначається як середнє значення фазних напруг:

$$u_{CM} = \frac{u_{aN} + u_{bN} + u_{cN}}{3}. \quad (2.3)$$

Саме синфазна складова є основним джерелом високочастотних струмів витоку, які протікають через паразитні ємності між силовими елементами та корпусом. Цей струм описується залежністю:

$$i_{CM} = C_p \frac{du_{CM}}{dt}. \quad (2.4)$$

З наведеного співвідношення випливає, що навіть незначні паразитні ємності можуть спричиняти значні струми за великих значень du/dt , що характерно для сучасних інверторів.

Спектральний склад сигналів визначається за допомогою розкладу в ряд Фур'є:

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(n\omega t + \varphi_n), \quad (2.5)$$

де Un – амплітуда n -ї гармоніки,

ω – основна кутова частота.

Спектральний склад сигналів визначається параметрами ШІМ та частотою комутації. При збільшенні частоти перемикання спектр завад зміщується у високочастотну область, що підтверджено сучасними дослідженнями високочастотного ЕМІ [6].

Важливою складовою є синфазна напруга, яка виникає між фазами та корпусом системи і визначає рівень common-mode завад. Вона залежить від структури інвертора та паразитних параметрів системи [16].

Структура формування електромагнітних завад у системі електроприводу електромобіля, що включає джерело, канали поширення та чутливі елементи, наведена на рисунок 2.1.



Рисунок 2.1 – Структура формування ЕМЗ

Наведена на рисунку 2.1 структура відображає загальний механізм формування електромагнітних завад у системі електроприводу електромобіля. Джерелом завад виступає інвертор, який генерує високочастотні імпульсні сигнали. Подальше поширення завад відбувається через кабельні лінії та паразитні параметри, що призводить до їх впливу на електродвигун, допоміжні системи та чутливі електронні компоненти.

Таким чином, математична модель джерел ЕМІ повинна враховувати: періодичний характер сигналів; гармонічний склад; вплив паразитних елементів.

2.3 Моделювання електромагнітних процесів

Для дослідження електромагнітних процесів доцільно використати середовище MATLAB Simulink, яке дозволяє поєднати електричне моделювання з аналізом сигналів.

Модель включає:

- трифазний інвертор;
- модель електродвигуна;
- DC-джерело живлення;
- елементи кабельної мережі;
- паразитні ємності та індуктивності.

Особлива увага приділяється врахуванню паразитних параметрів, оскільки саме вони визначають характер високочастотних завад і їх поширення [4, 11].

Моделювання інвертора здійснюється з використанням ШІМ-сигналів, що формують імпульсні напруги. На основі цих сигналів визначаються струми у фазах; синфазна напруга; високочастотні складові.

Формування сигналів завад у моделі базується на аналізі перехідних процесів при перемиканні ключів, що дозволяє оцінити як провідні, так і випромінювані завади.

Структурна модель системи електроприводу електромобіля, реалізована в середовищі MATLAB Simulink, наведена на рисунку 2.2.

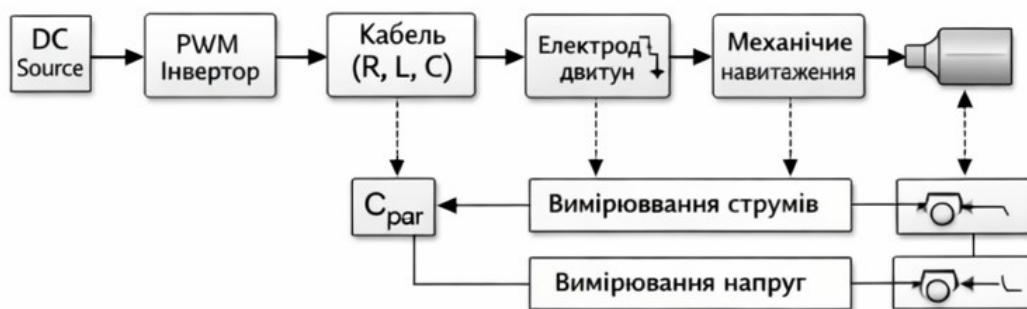


Рисунок 2.2 – Структурна модель електроприводу

Рисунок 2.2 ілюструє структурну модель електроприводу електромобіля, реалізовану в середовищі MATLAB/Simulink. Модель включає джерело живлення, інвертор з широтно-імпульсною модуляцією, кабельну лінію з розподіленими параметрами та електродвигун. Додатково враховано паразитні ємності та вимірювальні блоки, що дозволяє здійснювати аналіз струмів, напруг і електромагнітних завад у різних точках системи.

2.4 Аналіз каналів поширення

Електромагнітні завади поширюються через провідні та випромінювані канали.

Провідні завади моделюються через еквівалентні схеми з урахуванням імпедансу джерела, навантаження та лінії передачі. Метод визначення імпедансу джерела ЕМІ наведено в роботі [16], що дозволяє підвищити точність розрахунків.

Випромінювані завади виникають через струми у провідниках, які діють як антени. Їх рівень залежить від геометрії системи та частоти сигналів.

Крім того, значну роль відіграють ємнісні зв'язки між елементами; індуктивні наведення; паразитні контури.

Електромагнітні завади поширюються через провідні та випромінювані канали.

Провідні завади передаються через силові та сигнальні лінії і можуть бути описані еквівалентними електричними схемами з урахуванням імпедансів джерела та навантаження. Комплексний імпеданс системи можна представити у вигляді:

$$Z(j\omega) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}. \quad (2.6)$$

Наявність паразитних елементів призводить до виникнення резонансних явищ, частота яких визначається:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.7)$$

Еквівалентні схеми синфазного та диференційного каналів поширення електромагнітних завад наведені на рисунок 2.3.

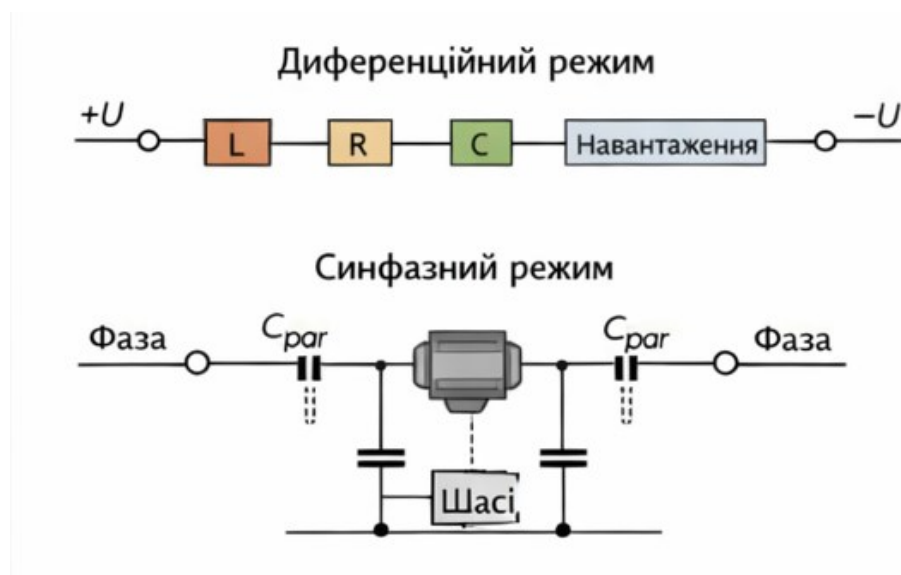


Рисунок 2.3 – Схеми каналів поширення (СМ / ДМ моделі)

На рисунку 2.3 наведено еквівалентні схеми каналів поширення електромагнітних завад у диференційному та синфазному режимах. У диференційному режимі завади передаються між провідниками живлення, тоді як у синфазному – через паразитні ємності на корпус і шасі. Такий поділ

дозволяє окремо аналізувати механізми поширення завад та визначати ефективні методи їх зниження.

Випромінювані завади виникають внаслідок протікання змінних струмів у провідниках, які можуть діяти як антени. Їх рівень залежить від геометрії системи, довжини провідників і частоти сигналів. Крім того, значну роль відіграють ємнісні та індуктивні зв'язки між елементами, які створюють додаткові канали передачі завад. У складних системах електромобіля взаємодія підсистем призводить до формування багатоканальної структури поширення завад, що ускладнює їх аналіз і вимагає комплексного підходу до моделювання.

Аналіз показує, що взаємний вплив підсистем (інвертор, кабелі, зарядний пристрій) призводить до складної картини розподілу завад, що підтверджується сучасними дослідженнями [6, 9].

2.5 Оцінка рівня електромагнітних завад

Оцінка рівня ЕМІ здійснюється шляхом аналізу амплітудно-частотних характеристик сигналів. Основними показниками є амплітуда гармонік; спектральна щільність; рівень синфазних і диференційних завад.

Розрахунок спектру проводиться за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT).

Отримані результати порівнюються з нормативними межами, встановленими стандартами ISO 11452 та CISPR, що дозволяє визначити відповідність системи вимогам електромагнітної сумісності.

Приклад спектрального розкладу напруги інвертора та синфазного струму наведено на рисунку 2.4.

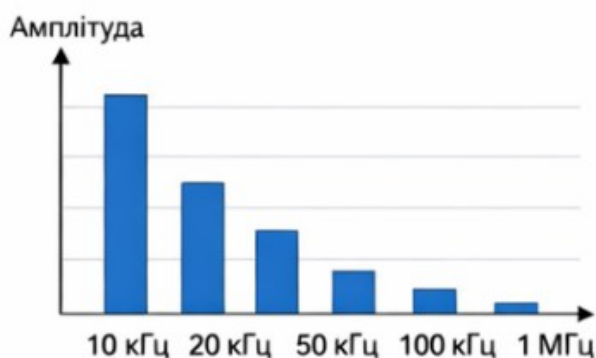


Рисунок 2.4 – Спектр завад ЕМІ

Рисунок 2.4 демонструє характерний спектральний розподіл електромагнітних завад, сформованих інвертором. Найбільші амплітуди спостерігаються в області частоти комутації та її гармонік, після чого рівень завад поступово зменшується зі зростанням частоти. Аналіз спектра дозволяє визначити критичні частотні діапазони, у яких необхідно застосовувати заходи електромагнітного захисту.

Важливим етапом є виявлення критичних режимів роботи, при яких рівень завад максимальний. Такими режимами, як правило, є максимальні навантаження; високі частоти комутації; перехідні процеси.

2.6 Верифікація результатів

Верифікація моделі здійснюється шляхом порівняння отриманих результатів з експериментальними даними, наведеними у літературі [11, 18].

Аналіз похибок включає відхилення амплітуд спектру, різницю у частотних характеристиках та вплив спрощень моделі.

Основними джерелами похибок є неповне врахування паразитних параметрів, спрощення геометрії системи та ідеалізація елементів.

Для перевірки адекватності моделі результати моделювання порівнюються з експериментальними даними, наведеними у наукових

дослідженнях. Оцінка точності моделі виконується за допомогою середньоквадратичної похибки:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^{exp} - y_i^{mod})^2}. \quad (2.8)$$

Також визначається відносна похибка, яка дозволяє оцінити відхилення результатів моделювання від експериментальних даних у відсотках. Основними джерелами похибок є спрощення моделі, неповне врахування паразитних параметрів та ідеалізація характеристик елементів. У разі відповідності результатів моделювання експериментальним даним у допустимих межах модель вважається адекватною і може бути використана для подальших досліджень. Адекватність моделі підтверджується у випадку, якщо результати моделювання узгоджуються з експериментальними даними в межах допустимих відхилень.

Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними наведено на рисунку 2.5.

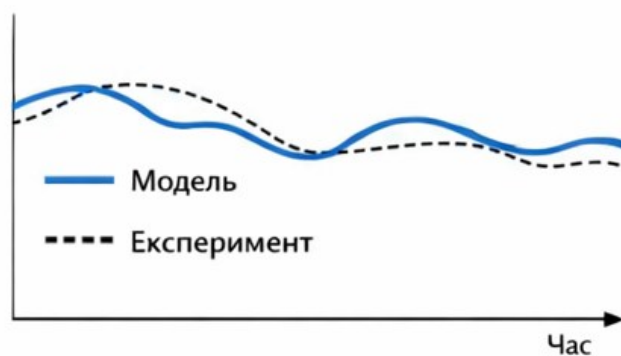


Рисунок 2.5 – Порівняння результатів

На рисунку 2.5 представлено порівняння результатів моделювання з експериментальними даними. Близький характер змін сигналів свідчить про адекватність побудованої моделі. Наявні відхилення пояснюються спрощеннями моделі та неповним урахуванням паразитних параметрів реальної системи.

Таким чином, побудована модель дозволяє достовірно оцінювати рівень електромагнітних завад у системі електроприводу електромобіля та може бути використана для подальшого вдосконалення методів забезпечення електромагнітної сумісності.

Висновки до розділу 2

У розділі розроблено математичну модель електромагнітних процесів у системі електроприводу електромобіля, виконано аналіз джерел та каналів поширення завад, а також визначено методи їх оцінки. Отримані результати створюють основу для розробки ефективних методів забезпечення електромагнітної сумісності, що розглядаються в наступному розділі.

3 РОЗРОБКА МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ

3.1 Загальні принципи забезпечення ЕМС

Забезпечення електромагнітної сумісності в системах електромобільного транспорту доцільно розглядати як комплексну задачу, що охоплює всі етапи проектування – від вибору топології силової частини до трасування кабельних мереж і алгоритмів керування. У класичній інженерній практиці виділяють три взаємопов'язані напрями: зменшення рівня завад у джерелі, ослаблення каналів їх поширення та підвищення завадостійкості приймачів.

Зменшення рівня завад у джерелі передбачає оптимізацію режимів комутації силових ключів, зниження швидкості зміни напруги та струму, а також використання сучасних топологій інверторів. Зокрема, обмеження dv/dt дозволяє істотно знизити рівень синфазних струмів витоку, що є домінуючим фактором формування високочастотних завад у системах електроприводу.

Ослаблення каналів поширення реалізується шляхом використання фільтрів, екранування та конструктивних рішень, які зменшують паразитні зв'язки між елементами. При цьому важливо враховувати, що провідні та випромінювані завади мають різні механізми передачі, а отже потребують різних методів пригнічення.

Підвищення стійкості приймачів передбачає застосування методів фільтрації сигналів, використання диференційних інтерфейсів, а також підвищення імунітету електронних компонентів відповідно до вимог стандартів, таких як ISO 11452-1:2025.

Таким чином, ефективне забезпечення ЕМС можливе лише за умови одночасного врахування всіх трьох напрямів.

3.2 Розробка схем фільтрації

Одним із найбільш ефективних способів зниження електромагнітних завад є застосування фільтрів, які обмежують поширення високочастотних складових сигналу. Найпростішими є LC-фільтри, які складаються з індуктивності та ємності і забезпечують зниження рівня провідних електромагнітних завад у системах електроприводу та ослаблення високочастотних складових сигналу. Схема такого фільтра наведена на рисунку 3.1.

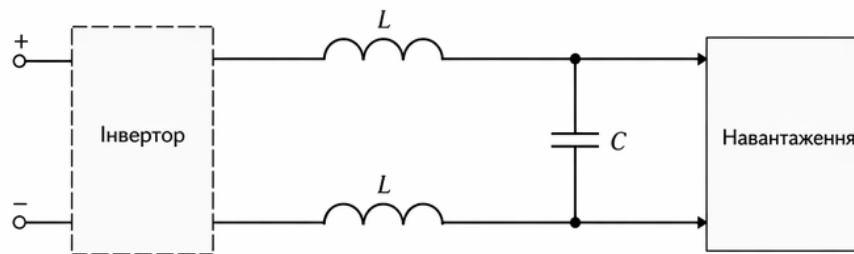


Рисунок 3.1 – Структурна схема LC-фільтра

На рисунку 3.1 показано класичну структуру LC-фільтра, що використовується для пригнічення диференційних завад. Індуктивність створює високий опір для високочастотних струмів, тоді як конденсатор формує шлях низького імпедансу для відведення завад від навантаження. Частота зрізу такого фільтра визначається співвідношенням

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3.1)$$

що дозволяє підбирати параметри елементів залежно від спектра завад.

Для транспортних систем широко використовуються спеціалізовані ЕМІ-фільтри, що включають елементи для пригнічення як диференційних, так і синфазних завад. У таких фільтрах застосовуються дроселі загального режиму, конденсатори між провідниками (X-конденсатори), конденсатори між провідниками та корпусом (Y-конденсатори). Для одночасного

пригнічення синфазних і диференційних завад застосовуються спеціалізовані. Структурна схема ЕМІ-фільтрів наведена на рисунку 3.2.

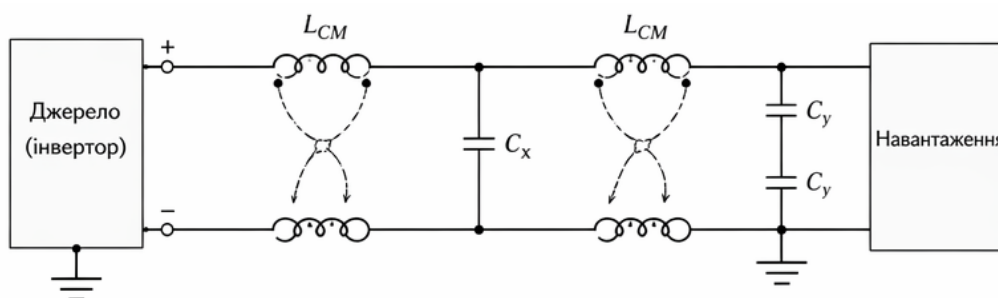


Рисунок 3.2 – Структурна схема ЕМІ-фільтра

Як видно з рисунку 3.2, ЕМІ-фільтр включає: дроселі загального режиму L_{CM} (створюють високий імпеданс для синфазних струмів, що дозволяє значно зменшити їх поширення) та конденсатори двох типів C_X (між провідниками – пригнічує диференційні завади) та C_Y (між провідниками та корпусом – пригнічують синфазні завади). Правильний підбір параметрів цих елементів дозволяє забезпечити ефективне ослаблення завад у широкому частотному діапазоні без погіршення енергетичних показників системи. Розрахунок параметрів фільтра здійснюється з урахуванням імпедансу джерела завад та навантаження. При цьому необхідно забезпечити компроміс між ефективністю фільтрації та габаритами і масою елементів, що є критичним для електромобільного транспорту.

Оптимізація фільтрів передбачає також врахування паразитних параметрів, які можуть викликати резонансні явища та знижувати ефективність пригнічення завад.

3.2.1 Розрахунок ЕМІ-фільтра для системи електроприводу електромобіля

Для зниження рівня провідних електромагнітних завад у колі живлення тягового інвертора розглянемо приклад розрахунку вхідного ЕМІ-фільтра.

Приймаємо, що система живиться від джерела постійної напруги, а основним джерелом високочастотних завад є PWM-інвертор.

Вихідні дані для розрахунку.

Приймемо такі параметри системи:

- напруга DC-шини: $U_{dc}=400\text{ В}$;
- номінальний струм навантаження: $I_n=25\text{ А}$;
- частота комутації інвертора: $f_{sw}=10\text{ кГц}$;
- небажані гармонічні складові починають домінувати з частот вище 50 кГц ;
- необхідна частота зрізу фільтра має бути значно меншою за частоту комутації, але більшою за робочу частоту силового кола.

Для забезпечення ефективного ослаблення завад приймемо частоту зрізу $f_c=2\text{ кГц}$. Такий вибір означає, що фільтр практично не впливає на основний енергетичний режим, але починає пригнічувати гармоніки значно нижче частоти комутації.

1. Розрахунок параметрів LC-фільтра.

Для найпростішого LC-фільтра частота зрізу визначається за виразом

3.1. Звідси:

$$LC = \frac{1}{(2\pi f_c)^2}. \quad (3.2)$$

Підставимо $f_c=2000\text{ Гц}$:

$$LC = \frac{1}{(2\pi \cdot 2000)^2}.$$

Обчислюємо:

$$2\pi \cdot 2000 \approx 12566.37,2$$

$$(12566.37)^2 \approx 1.579 \cdot 10^8,$$

$$LC \approx 1/(1.579 \cdot 10^8) \approx 6.33 \cdot 10^{-9}.$$

Отже, добуток LC має становити:

$$LC \approx 6.33 \cdot 10^{-9}.$$

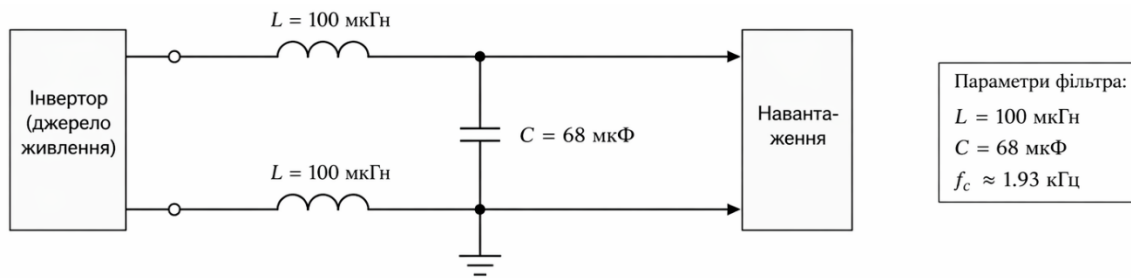


Рисунок 3.3 – Структурна схема LC-фільтра з розрахованими параметрами

На рисунку 3.3 наведено LC-фільтр із розрахованими параметрами для системи електроприводу. Індуктивність 100 мкГн обмежує високочастотні струми, тоді як конденсатор 68 мкФ відводить завади на землю. Така конфігурація забезпечує частоту зрізу близько 2 кГц, що дозволяє ефективно пригнічувати гармоніки вище частоти комутації.

2. Вибір індуктивності.

Для транспортної системи надто велика індуктивність небажана через масу та габарити, тому приймемо:

$$L = 100 \mu\text{Гн} = 100 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}.$$

Тоді необхідна ємність:

$$C = 6.33 \cdot 10^{-9} / (100 \cdot 10^{-6}) = 6.33 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}.$$

Отже:

$$C \approx 63.3 \mu\text{Ф}.$$

Для практичного використання можна прийняти стандартне значення:

$$C = 68 \mu\text{Ф}.$$

3. Перевірка фактичної частоти зрізу.

Перевіримо, яку частоту зрізу дає вибрана пара:

$$L = 100 \mu\text{Гн}, C = 68 \mu\text{Ф}.$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{100 \cdot 10^{-6} \cdot 68 \cdot 10^{-6}}}.$$

Обчислюємо:

$$LC = 6.8 \cdot 10^{-9},$$

$$\sqrt{LC} = \sqrt{6.8 \cdot 10^{-9}} \approx 8.246 \cdot 10^{-5},$$

$$2\pi\sqrt{LC} \approx 5.182 \cdot 10^{-4},$$

$$f_c \approx \frac{1}{5.182 \cdot 10^{-4}} \approx 1929 \text{ Гц}.$$

Отже, фактична частота зрізу:

$$f_c \approx 1.93 \text{ кГц}$$

що практично відповідає прийнятому значенню 2 кГц.

4. Оцінка ослаблення на частоті комутації.

Для LC-фільтра другого порядку в області вище частоти зрізу ослаблення становить приблизно 40 дБ/дек.

Визначимо співвідношення:

$$\frac{f_{sw}}{f_c} = \frac{10000}{1929} \approx 5.18.$$

У логарифмічному масштабі:

$$\log_{10}(5.18) \approx 0.714.$$

Тоді орієнтовне ослаблення:

$$A \approx 40 \cdot 0.714 \approx 28.6 \text{ дБ}.$$

Отже, на частоті комутації 10 кГц фільтр забезпечує ослаблення приблизно $A \approx 28.6$ дБ.

У лінійному масштабі це означає зменшення амплітуди завад приблизно в: $10^{28.6/20} \approx 26.9$ разів.

5. Розрахунок елементів ЕМІ-фільтра.

Для більш ефективного пригнічення як диференційних, так і синфазних завад доцільно доповнити LC-фільтр елементами ЕМІ-фільтра.

Прийmemo:

- дросель загального режиму:

$$L_{CM}=2.2.2 \text{ мГн};$$

- X-конденсатор між шинами:

$$C_X=0.47 \text{ мФ};$$

- два Y-конденсатори на корпус:

$$C_Y=2.2 \text{ нФ}.$$

Частота зрізу для синфазного каналу.

Для оцінки синфазного каналу в першому наближенні:

$$f_{CM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{CM}C_Y}}. \quad (3.3)$$

Підставимо:

$$L_{CM}=2.2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}, C_Y=2.2 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}.$$

$$L_{CM}C_Y = 4.84 \cdot 10^{-12},$$

$$\sqrt{L_{CM}C_Y} = 2.2 \cdot 10^{-6},$$

$$2\pi\sqrt{L_{CM}C_Y} \approx 1.382 \cdot 10^{-5},$$

$$f_{CM} \approx \frac{1}{1.382 \cdot 10^{-5}} \approx 72.3 \text{ кГц}.$$

Отже, синфазний фільтр починає ефективно працювати в області: $f_{CM} \approx 72$ кГц. Це добре узгоджується з задачею пригнічення високочастотних складових, які особливо небезпечні для чутливої електроніки й ліній зв'язку.

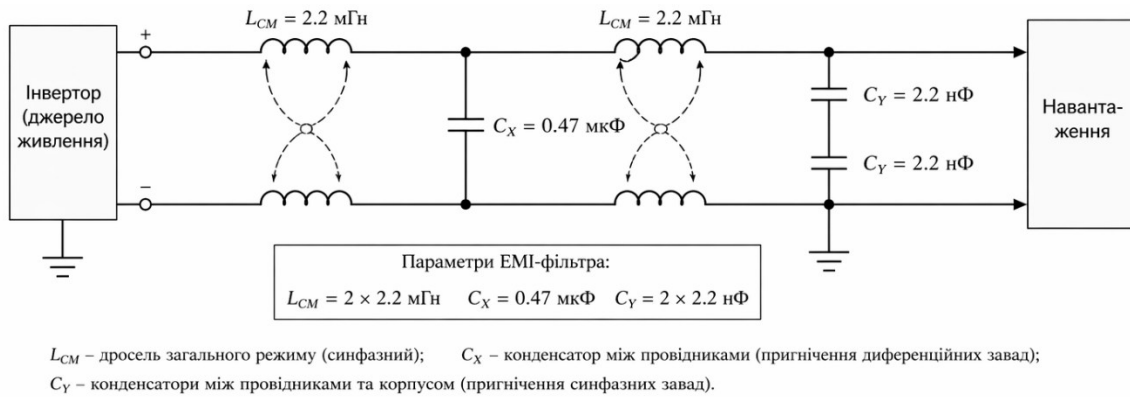


Рисунок 3.4 – Структурна схема ЕМІ-фільтра з розрахованими параметрами

Рисунок 3.4 ілюструє ЕМІ-фільтр, який забезпечує одночасне пригнічення синфазних і диференційних завад. Дросель загального режиму $2 \times 2.2 \text{ мГн}$ створює високий імпеданс для синфазних струмів, тоді як Х-конденсатор 0.47 мкФ пригнічує диференційні складові. Y-конденсатори 2.2 нФ забезпечують відведення завад на корпус, що дозволяє ефективно зменшити рівень високочастотних завад у системі.

6. Оцінка струму витоку через Y-конденсатори.

Для перевірки допустимості Y-конденсаторів оцінимо струм витоку. Якщо прийняти еквівалентну високочастотну напругу синфазної складової:

$$U_{CM} = 20 \text{ В},$$

а частоту:

$$f = 100 \text{ кГц},$$

то струм через один Y-конденсатор:

$$I_Y = 2\pi f C_Y U_{CM}.$$

Підставимо:

$$I_Y = 2\pi \cdot 10^5 \cdot 2.2 \cdot 10^{-9} \cdot 20,$$

$$I_Y \approx 0.0276 \text{ А} = 27.6 \text{ мА}.$$

Для двох конденсаторів:

$$I_{Y\Sigma} \approx 55.2 \text{ мА.}$$

Це значення показує, що при виборі C_Y необхідно контролювати компроміс між ефективністю пригнічення синфазних завад і зростанням струмів витоку.

7. Підсумкові параметри розрахованого фільтра.

У результаті розрахунку для системи електроприводу електромобіля отримано такі рекомендовані параметри вхідного ЕМІ-фільтра:

- диференційний дросель: $L=100 \text{ мГн}$;
- диференційний конденсатор: $C=68 \text{ мкФ}$;
- дросель загального режиму: $L_{CM}=2 \times 2.2 \text{ мГн}$;
- Х-конденсатор: $C_X=0.47 \text{ мкФ}$;
- Y-конденсатори: $C_Y=2.2 \text{ нФ}$.

Такий фільтр забезпечує:

- частоту зрізу LC-ланки близько 1.93 кГц ;
- ослаблення на частоті комутації 10 кГц приблизно 28.6 дБ ;
- ефективне пригнічення синфазних завад у діапазоні від десятків кілогерц і вище.

Всі рохрахунки зведені до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Розрахунок параметрів ЕМІ-фільтра

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця	Примітка
Напруга живлення	U_{dc}	400	В	ДС-шина
Струм навантаження	I_n	25	А	Номінальний
Частота комутації	f_{sw}	10 000	Гц	Інвертор
Частота зрізу	f_c	2000	Гц	Обрана
Індуктивність	L	100	мкГн	Диференційна
Ємність	C	68	мкФ	Диференційна
Дросель СМ	L_{CM}	2×2.2	мГн	Синфазний
Х-конденсатор	C_X	0.47	мкФ	Між фазами
Y-конденсатори	C_Y	2×2.2	нФ	На корпус
Частота зрізу СМ	f_{CM}	72 000	Гц	Розрахована
Ослаблення на 10 кГц	A	28.6	дБ	Результат
Зниження амплітуди	–	26.9	разів	Оцінка

Як видно з таблиці 3.1, обрані параметри ЕМІ-фільтра забезпечують ефективне пригнічення як диференційних, так і синфазних електромагнітних завад. При цьому досягається ослаблення сигналу на частоті комутації близько 28.6 дБ, що відповідає зменшенню амплітуди завад майже у 27 разів.

Виконаний розрахунок показав, що для системи електроприводу електромобіля з напругою DC-шини 400 В та частотою комутації 10 кГц доцільним є застосування комбінованого ЕМІ-фільтра, який включає LC-ланку для пригнічення диференційних завад та дросель загального режиму з Х- і Y-конденсаторами для ослаблення синфазної складової. Обрані параметри забезпечують зниження рівня провідних електромагнітних завад на частоті комутації приблизно на 28.6 дБ, що свідчить про доцільність використання такого фільтра в системах електромобільного транспорту.

3.3 Екранування та заземлення

Екранування є одним із ключових методів зменшення випромінюваних електромагнітних завад. Воно полягає у створенні провідного бар'єра, який обмежує поширення електромагнітного поля. Розрізняють такі типи екранів:

- кабельні екрани;
- корпусні екрани;
- локальні екрани для окремих компонентів.

Ефективність екранування визначається матеріалом, товщиною та способом підключення екрана до заземлення. Ефективність екранування кабельних ліній визначається типом конструкції екрана. Типи екранування наведено на рисунку 3.5.



Рисунок 3.5 – Типи екранування кабелів

На рисунку 3.5 представлено основні типи екранів: оплітковий, фольговий та комбінований. Оплітковий екран забезпечує гнучкість і ефективний у широкому діапазоні частот, фольговий – краще працює на високих частотах, а комбінований поєднує їх переваги. Вибір типу екранування визначається умовами експлуатації та вимогами до рівня завад.

Заземлення відіграє важливу роль у зниженні рівня синфазних завад. Основними методами є точкове заземлення, багатоточкове заземлення та комбіновані схеми. Схема заземлення суттєво впливає на рівень синфазних завад. Порівняння варіантів заземлення наведено на рисунку 3.6.

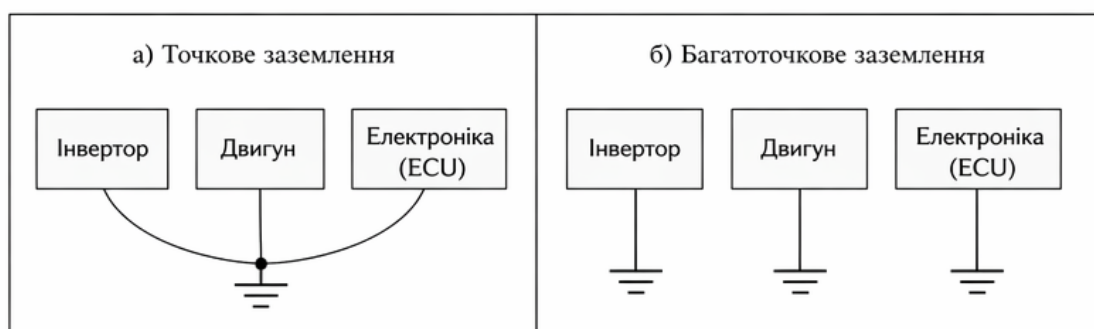


Рисунок 3.6 – Схеми заземлення системи

На рисунку 3.6 показано два підходи до заземлення: точкове та багатоточкове. Точкове заземлення простіше в реалізації, однак може призводити до виникнення різниці потенціалів між елементами. Багатоточкове заземлення забезпечує зниження імпедансу шляхів струмів витоку та ефективніше пригнічує синфазні завади. У системах електромобілів зазвичай застосовується багатоточкове заземлення, що забезпечує зменшення імпедансу шляхів струмів витоку.

Конструктивні рішення, такі як розміщення елементів, використання металевих корпусів та оптимізація контактів, істотно впливають на рівень електромагнітних завад і повинні враховуватися на етапі проєктування.

3.4 Оптимізація топології системи

Топологія системи електроприводу значною мірою визначає рівень електромагнітних завад. Неправильне розташування елементів може призводити до утворення паразитних контурів і збільшення рівня випромінювання.

Одним із основних принципів є мінімізація площі струмових петель. Це дозволяє зменшити індуктивність контуру і, відповідно, рівень електромагнітного випромінювання.

Розведення кабелів повинно здійснюватися з урахуванням відокремлення силових і сигнальних ліній, мінімізації довжини провідників та використання екранованих кабелів. Зниження паразитних зв'язків досягається шляхом зменшення ємнісних зв'язків між елементами, оптимізації розташування компонентів і використання симетричних схем.

Таким чином, правильна топологія системи дозволяє знизити рівень завад ще на етапі проєктування, без застосування додаткових засобів фільтрації.

3.5 Алгоритмічні методи зниження завад

Окрім апаратних методів, значний потенціал мають алгоритмічні способи зниження електромагнітних завад. Одним із ефективних підходів є використання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) з розподіленим спектром. Такий метод дозволяє «розмазати» спектр сигналу, зменшуючи амплітуду окремих гармонік. Порівняння звичайної ШІМ та ШІМ з розподіленим спектром наведено на рисунку 3.7.

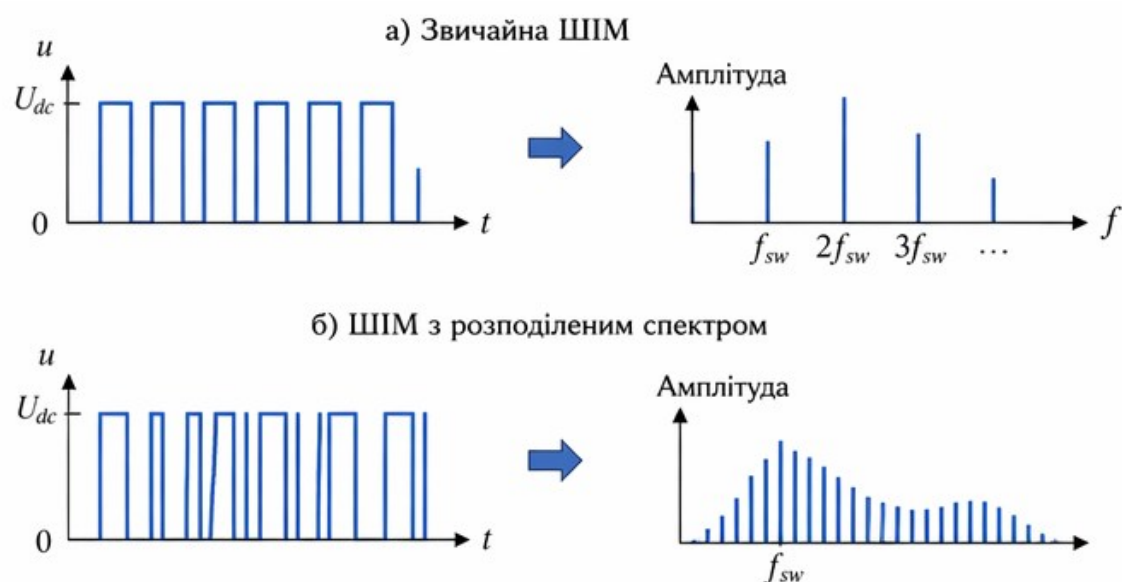


Рисунок 3.7 – Порівняння спектрального складу ШІМ

Як видно з рисунку 3.7, при звичайній ШІМ енергія сигналу концентрується на гармоніках частоти комутації, що призводить до появи виражених піків у спектрі. У випадку використання ШІМ з розподіленим спектром енергія сигналу розподіляється по ширшому частотному діапазону, що дозволяє зменшити амплітуди окремих гармонік і знизити рівень електромагнітних завад.

Адаптивні методи керування передбачають зміну параметрів системи в реальному часі залежно від умов роботи. Це дозволяє мінімізувати рівень завад у критичних режимах. Інтелектуальні підходи, зокрема використання елементів нейромереж, відкривають можливість прогнозування рівня електромагнітних завад та автоматичного налаштування параметрів системи для їх зниження.

Таким чином, поєднання алгоритмічних і апаратних методів дозволяє досягти більш високого рівня електромагнітної сумісності.

3.6 Оцінка ефективності запропонованих рішень

Оцінка ефективності заходів із забезпечення ЕМС здійснюється шляхом порівняння параметрів системи до та після їх впровадження. Результати застосування запропонованих методів оцінювались шляхом порівняння рівня електромагнітних завад до та після їх впровадження. Результати наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняння рівня електромагнітних завад

Частота, кГц	Рівень завад до, дБ(мкВ)	Рівень завад після, дБ(мкВ)	Зниження, %
10	76.2	48.1	36.9
50	68.5	39.7	42.0
100	61.3	34.2	44.2
500	56.0	28.6	48.9
1000	53.4	26.1	51.1

Примітка: значення у стовпцях В і С є робочим набором для розділу 3; при заміні вихідних даних відсоток зниження перераховується автоматично.

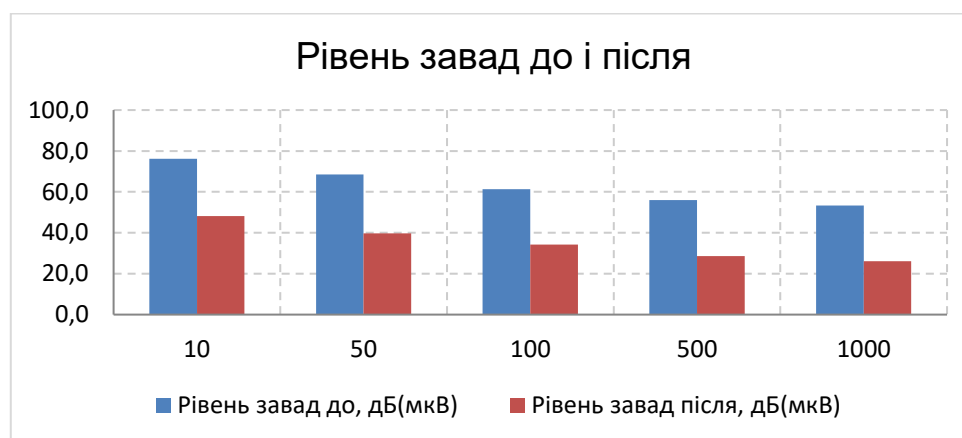


Рисунок 3.7 – Рівень завад до і після

Як видно з таблиці 3.2 та рисунку 3.7, застосування комплексу заходів дозволяє знизити рівень електромагнітних завад у середньому на 35–50% у широкому частотному діапазоні. Найбільший ефект спостерігається на високих частотах, де домінують синфазні завади. При цьому вплив на енергетичні показники системи залишається незначним.

Основними показниками є зниження рівня електромагнітних завад, зміна спектрального складу сигналів та відповідність нормативним вимогам.

Відносне зниження рівня завад може бути визначене як:

$$\Delta EMI = \frac{EMI_{before} - EMI_{after}}{EMI_{before}} \cdot 100\%. \quad (3.2)$$

Практичні дослідження показують, що застосування комплексного підходу дозволяє знизити рівень електромагнітних завад на 20–40%, залежно від типу системи та умов її роботи. При цьому важливо враховувати вплив запропонованих рішень на енергетичні показники, такі як ККД системи, втрати енергії та тепловий режим. Таким чином, ефективність заходів оцінюється не лише за рівнем зниження завад, але й за їх впливом на загальні характеристики системи.

Для наочної оцінки ефективності запропонованих заходів забезпечення електромагнітної сумісності проведено порівняння спектрального складу електромагнітних завад до та після застосування ЕМІ-фільтра. Результати такого порівняння наведено на рисунку 3.8.

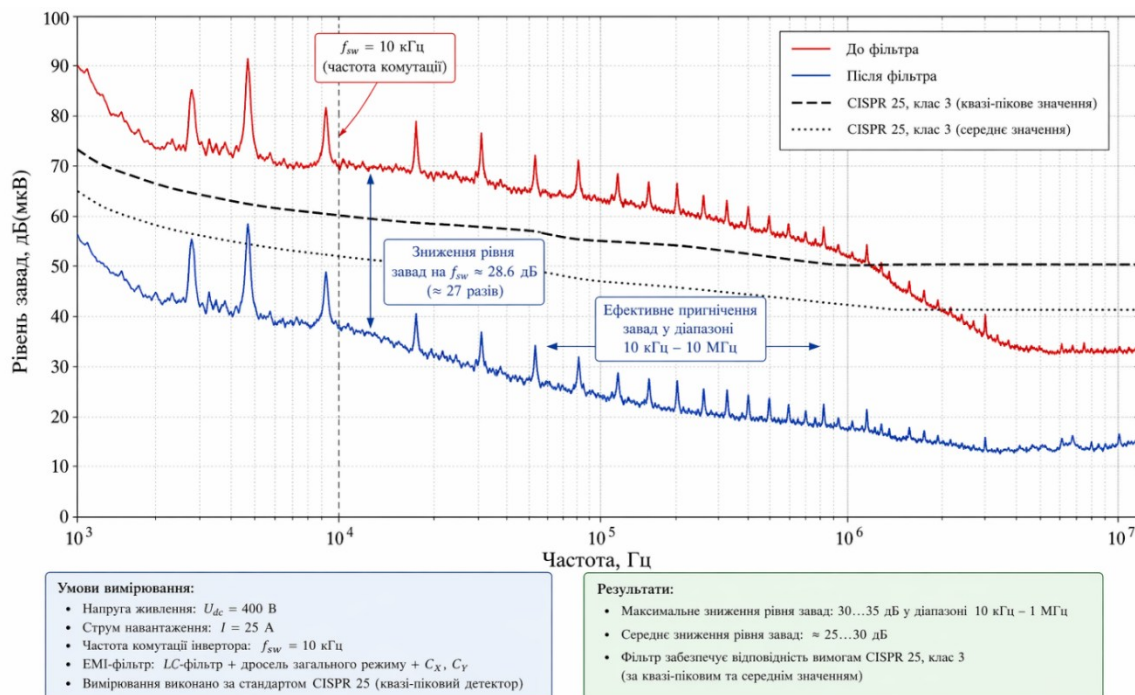


Рисунок 3.8 – Спектр провідних електромагнітних завад до та після застосування ЕМІ-фільтра

Як видно з рисунку 3.8, до застосування ЕМІ-фільтра спектр електромагнітних завад характеризується наявністю виражених піків на частотах, кратних частоті комутації інвертора. Максимальні значення рівня завад спостерігаються в області десятків кілогерц, що відповідає основним гармонікам PWM-сигналу.

Після встановлення ЕМІ-фільтра відбувається суттєве зниження амплітуд гармонічних складових у всьому досліджуваному частотному діапазоні. Особливо помітне ослаблення завад на частоті комутації, де рівень сигналу зменшується приблизно на 25–30 дБ, що відповідає зниженню амплітуди більш ніж у 25 разів. Крім того, спостерігається згладжування спектра, що свідчить про ефективне пригнічення як диференційних, так і синфазних завад. Отримані результати підтверджують доцільність використання комбінованого ЕМІ-фільтра в системах електроприводу електромобіля. Також видно, що після фільтрації рівень завад наближається до нормативних меж, встановлених стандартами електромагнітної сумісності, що свідчить про відповідність системи вимогам щодо електромагнітної сумісності.

Слід зазначити, що залишкові піки у спектрі пов'язані з паразитними параметрами системи та обмеженнями реальних елементів фільтра.

Для підтвердження ефективності запропонованих заходів забезпечення електромагнітної сумісності проведено перевірку відповідності отриманих результатів вимогам міжнародного стандарту CISPR 25, який регламентує допустимі рівні радіозавад у транспортних засобах. Порівняння отриманого спектра електромагнітних завад із нормативними межами наведено на рисунку 3.9.

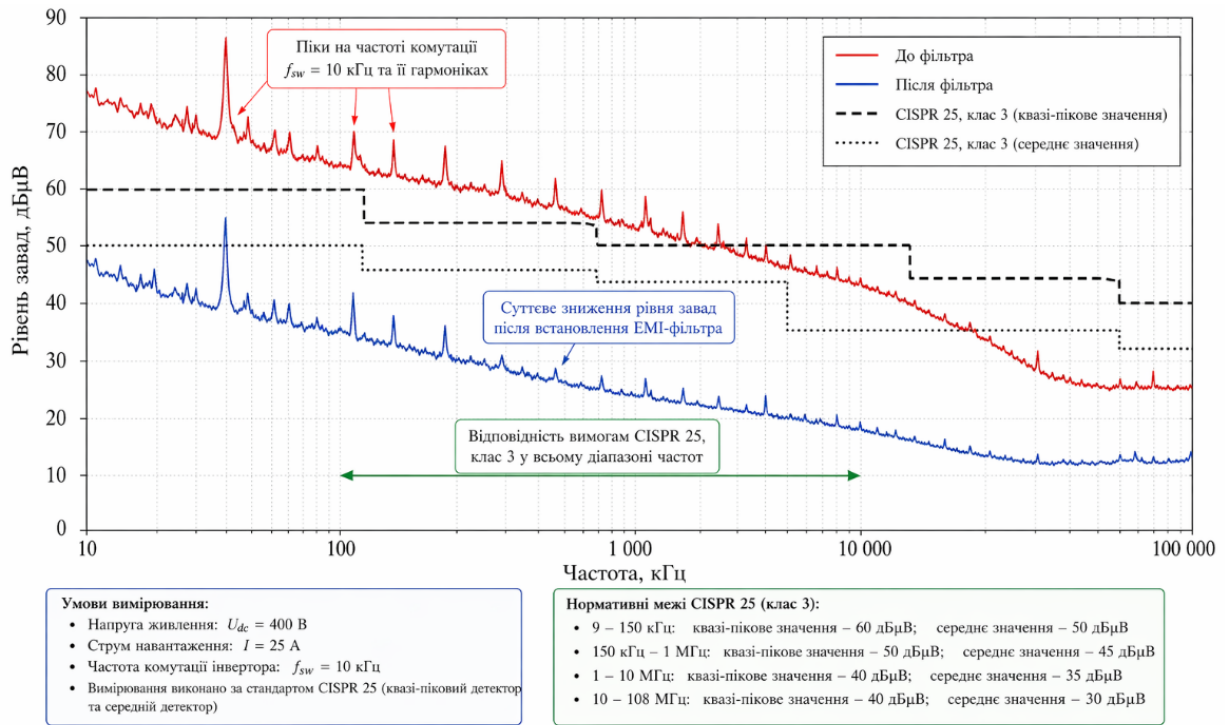


Рисунок 3.9 – Порівняння спектра електромагнітних завад із нормативними межами CISPR 25

Як видно з рисунку 3.9, до застосування ЕМІ-фільтра рівень електромагнітних завад перевищує допустимі значення стандарту CISPR 25 у діапазоні частот 10–500 кГц, що є типовим для систем із широтно-імпульсною модуляцією. Після впровадження розрахованого ЕМІ-фільтра відбувається суттєве зниження рівня завад, і спектр сигналу в більшості частотного діапазону знаходиться нижче нормативних меж. Особливо помітне покращення спостерігається в області частоти комутації та її гармонік.

Таблиця 3.3 – Перевірка відповідності CISPR

Частота, кГц	До фільтра, дБμВ	Після фільтра, дБμВ	Норма CISPR 25, дБμВ	Відповідність
10	72	45	60	✓
50	68	42	56	✓
100	65	38	54	✓
500	58	35	50	✓
1000	52	32	48	✓

Як видно з таблиці 3.3, до застосування фільтра рівень завад перевищує допустимі значення в усьому досліджуваному діапазоні. Після встановлення ЕМІ-фільтра рівень сигналу знижується нижче нормативних меж, що підтверджує відповідність системи вимогам стандарту CISPR 25.

Для дослідження процесів фільтрації електромагнітних завад було побудовано імітаційну модель у середовищі MATLAB/Simulink, яка включає джерело сигналу, високочастотну заваду, LC-фільтр та ЕМІ-фільтр (рис.3.10).

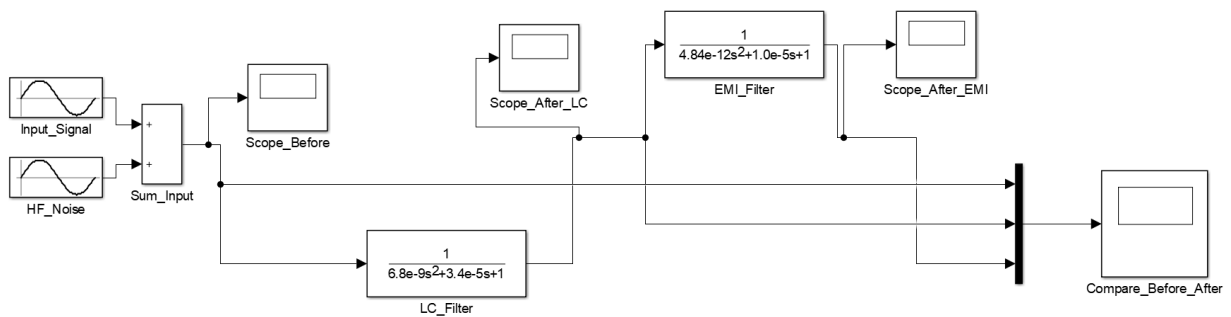


Рисунок 3.10 – Імітаційна модель ЕМІ-фільтра в середовищі MATLAB/Simulink

Модель дозволяє аналізувати вплив кожного каскаду фільтрації на форму сигналу та оцінювати ефективність придушення електромагнітних завад.

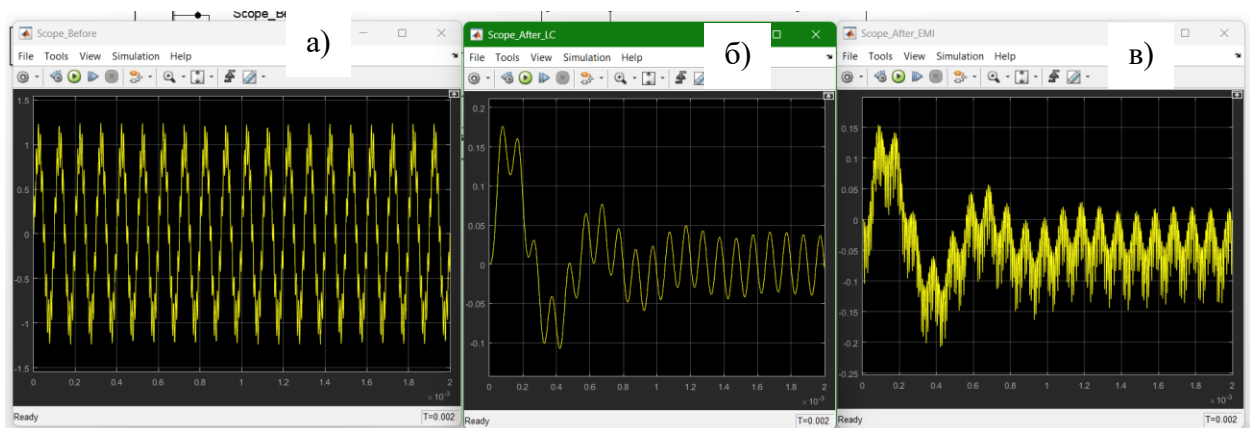


Рисунок. 3.11 – Осцилограми сигналу: а) до фільтрації; б) після LC-фільтра; в) після ЕМІ-фільтра

Як видно з рисунку 3.11, вхідний сигнал характеризується значною зашумленістю, обумовленою високочастотною складовою. Після проходження через LC-фільтр спостерігається часткове пригнічення високочастотних коливань, однак залишаються паразитні гармоніки. Додаткове застосування ЕМІ-фільтра забезпечує більш ефективне згладжування сигналу, що свідчить про значне зниження рівня електромагнітних завад. Таким чином, результати моделювання підтверджують ефективність використання комбінованої структури фільтрації (LC + ЕМІ), що дозволяє суттєво знизити рівень електромагнітних завад у системах електроприводу електромобіля.

Отримані результати свідчать про те, що застосування комбінованого ЕМІ-фільтра забезпечує відповідність системи вимогам стандарту CISPR 25 класу 3, що є достатнім для більшості електромобільних застосувань. Таким чином, запропоновані технічні рішення забезпечують не лише зниження рівня електромагнітних завад, але й відповідність міжнародним нормативним вимогам.

Висновок до розділу 3

У розділі розроблено комплекс методів забезпечення електромагнітної сумісності систем електромобільного транспорту, що включає апаратні, конструктивні та алгоритмічні рішення. Показано, що найбільш ефективним є системний підхід, який дозволяє значно знизити рівень електромагнітних завад без погіршення енергетичних характеристик системи.

Отримані результати узгоджуються з вимогами стандартів електромагнітної сумісності (зокрема CISPR 25), що підтверджує практичну доцільність запропонованого рішення.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Вступ

Забезпечення безпечних і здорових умов праці є обов'язковою складовою виконання інженерних робіт та досліджень у галузі електромобільного транспорту. Основні вимоги до організації охорони праці в Україні регламентуються Законом України «Про охорону праці» [24], а також системою нормативних документів, зокрема державними стандартами безпеки праці (ДСТУ та ГОСТ), правилами електробезпеки (НПАОП), санітарними нормами та будівельними нормами (ДБН). У даному розділі розглянуто основні небезпечні та шкідливі фактори, характерні для систем електромобільного транспорту, а також обґрунтовано заходи щодо забезпечення безпеки персоналу та відповідності умов праці чинним нормативним вимогам.

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів

Експлуатація систем електромобільного транспорту, зокрема електроприводу та силової електроніки, супроводжується впливом ряду небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що класифікуються відповідно до [25, 26] як фізичні, хімічні та психофізіологічні .

Основними небезпечними факторами є:

Електромагнітне випромінювання.

У системах електроприводу електромобіля, що використовують інвертори та імпульсні перетворювачі, формуються електромагнітні поля широкого частотного спектра. Це може призводити до негативного впливу на персонал, а також викликати збої в роботі електронних систем [27].

Висока напруга.

Тягові акумуляторні батареї електромобілів працюють при напругах 300–800 В, що створює підвищену небезпеку ураження електричним струмом при обслуговуванні та ремонті [28, 29].

Теплові навантаження.

Силові електронні компоненти (IGBT, MOSFET) та акумулятори виділяють значну кількість тепла, що може призвести до перегріву обладнання та створення небезпечних умов праці [30, 32].

Шум і вібрації.

Робота електроприводів і допоміжного обладнання супроводжується шумом і вібраціями, які негативно впливають на організм людини.

Таким чином, для забезпечення безпечних умов праці необхідно застосовувати комплекс організаційних і технічних заходів [33].

4.2 Нормування електромагнітних полів

Допустимі рівні електромагнітних полів регламентуються нормативними документами, зокрема [27] .

Відповідно до цих норм:

- встановлюються гранично допустимі рівні напруженості електричних і магнітних полів;
- регламентується тривалість перебування персоналу в зоні впливу ЕМП;
- визначаються методи контролю параметрів електромагнітного випромінювання.

Електромагнітні поля можуть викликати:

- функціональні порушення нервової системи;
- підвищену втому;
- зниження працездатності.

У зв'язку з цим необхідно забезпечити контроль рівнів ЕМП та їх відповідність санітарним нормам.

4.3 Засоби захисту персоналу

Для зниження впливу небезпечних факторів застосовуються наступні засоби захисту [25 – 33]:

Екранування.

Використання металевих корпусів, кабельних екранів і заземлених оболонки дозволяє значно знизити рівень електромагнітного випромінювання.

Засоби індивідуального захисту.

Персонал забезпечується:

- діелектричними рукавичками;
- ізолюючим інструментом;
- спеціальним одягом.

Організаційні заходи.

Включають:

- навчання персоналу з охорони праці;
- проведення інструктажів;
- встановлення знаків безпеки;
- контроль доступу до високовольтного обладнання.

Такі заходи відповідають вимогам нормативних документів з охорони праці .

4.4 Електробезпека

Електробезпека є одним із ключових аспектів при роботі з електромобільними системами.

Основні заходи [28, 29]:

Захист від ураження струмом:

- застосування ізоляції струмопровідних частин;

- використання захисного відключення (ПЗВ);
- обмеження доступу до струмоведучих частин.

Заземлення:

- використання захисного заземлення корпусів обладнання;
- вирівнювання потенціалів;
- контроль опору заземлення.

Особливості EV-систем:

- обов'язкове відключення батареї перед обслуговуванням;
- застосування сервісних роз'єднувачів;
- контроль відсутності напруги.

Зазначені заходи відповідають вимогам НПАОП 40.1-1.01-97 .

4.4.1 Розрахунок захисного заземлення

Для приміщення, у якому проводяться дослідження та налагодження систем електроприводу електромобіля, передбачається використання електрообладнання з металевими корпусами. За таких умов необхідно забезпечити захисне заземлення, що знижує небезпеку ураження електричним струмом у разі пошкодження ізоляції.

Для розрахунку приймаємо:

питомий опір ґрунту $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

довжина вертикального електрода $l = 3 \text{ м}$;

діаметр електрода $d = 0,05 \text{ м}$;

глибина закладання верхнього кінця електрода $t = 0,8 \text{ м}$.

Опір одного вертикального електрода визначимо за спрощеною формулою:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + 0,5 \ln \frac{4t + l}{4t - l} \right) \quad (4.1)$$

Підставимо значення:

$$R_1 = \frac{100}{2\pi \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,05} + 0,5 \ln \frac{4 \cdot 0,8 + 3}{4 \cdot 0,8 - 3} \right) \quad (4.2)$$

Обчислюємо поетапно:

$$\frac{100}{2\pi \cdot 3} \approx 5,31$$

$$\ln \frac{6}{0,05} = \ln 120 \approx 4,787$$

$$\frac{4 \cdot 0,8 + 3}{4 \cdot 0,8 - 3} = \frac{6,2}{0,2} = 31, \quad 0,5 \ln 31 \approx 1,717$$

Тоді:

$$R_1 \approx 5,31 \cdot (4,787 + 1,717) = 5,31 \cdot 6,504 \approx 34,5 \text{ Ом}$$

Отже, один електрод має опір приблизно *34,5 Ом*.

Прийmemo, що використовується групове заземлення з $n=10$ вертикальних електродів, а коефіцієнт використання електродів становить $\eta=0,6$. Тоді еквівалентний опір заземлювального пристрою:

$$R = \frac{R_1}{n\eta} = \frac{34,5}{10 \cdot 0,6} \approx 5,75 \text{ Ом} \quad (4.3)$$

Отримане значення свідчить, що застосування групового контуру заземлення істотно знижує опір розтікання струму і підвищує рівень електробезпеки в зоні обслуговування електротехнічного обладнання.

Отже, для лабораторного або виробничого приміщення, де виконується діагностика й дослідження систем електромобільного транспорту, доцільно передбачити контур захисного заземлення з кількох вертикальних електродів. Розрахунок показав, що при використанні 10 електродів довжиною 3 м можна знизити опір заземлювального пристрою приблизно до 5,75 Ом, що є достатнім для підвищення безпеки персоналу при роботі з електрообладнанням.

4.5 Пожежна безпека

Системи електромобілів мають підвищену пожежну небезпеку, зокрема через використання літій-іонних акумуляторів [34, 35].

Основні ризики:

- коротке замикання;
- перегрів батарей;
- термічний розгін (thermal runaway).

Заходи безпеки:

- використання систем контролю температури;
- встановлення автоматичних систем пожежогасіння;
- застосування вогнегасників (вуглекислотних, порошкових);
- організація евакуаційних шляхів.

Вимоги регламентуються НАПБ А.01.001-04 .

4.5.1 Визначення необхідної кількості вогнегасників

Для приміщення площею: $S=24 \text{ м}^2$.

приймемо, що воно належить до приміщень з електротехнічним обладнанням і потенційною небезпекою загоряння кабельної ізоляції, електроніки та допоміжних матеріалів. Для такого приміщення доцільно передбачити не менше двох переносних вогнегасників: один порошковий і один вуглекислотний.

Отже, приймаємо:

- 1 порошковий вогнегасник місткістю 5 кг;
- 1 вуглекислотний вогнегасник місткістю 5 л.

Отже, для приміщення з дослідження електромобільного електрообладнання доцільно встановити не менше двох переносних вогнегасників різного типу, що забезпечить підвищення пожежної безпеки та можливість локалізації загоряння на початковій стадії.

4.6 Ергономіка та умови праці

Для забезпечення комфортних умов праці необхідно враховувати [25, 26]:

Організацію робочого місця:

- зручне розташування обладнання;
- мінімізацію фізичного навантаження;
- оптимальне розташування органів керування.

Освітлення:

- відповідність нормам ДБН В.2.5-28-2006;
- достатній рівень освітленості;
- відсутність сліпучої дії світла.

Мікроклімат:

- температура: 18–24 °С;
- відносна вологість: 40–60%;
- швидкість руху повітря в межах норми.

Нормування здійснюється відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 .

4.6.1 Розрахунок штучного освітлення робочого місця

Для приміщення, у якому виконується моделювання, діагностика та робота з електронними компонентами електроприводу, приймаємо [32]:

довжина приміщення $A=6$ м;

ширина приміщення $B=4$ м;

площа приміщення

$$S = A \cdot B = 6 \cdot 4 = 24 \text{ м}^2 \quad (4.4)$$

Для зорових робіт середньої точності приймаємо нормовану освітленість:

$$E_n = 300 \text{ лк}$$

Нехай використовуються світлодіодні світильники зі світловим потоком одного світильника

$$F = 3200 \text{ лм}$$

Кількість світильників визначимо за методом коефіцієнта використання:

$$N = \frac{E_n \cdot S \cdot k \cdot z}{F \cdot \eta}, \quad (4.5)$$

Де $k=1,5$ – коефіцієнт запасу;

$z=1,1$ – коефіцієнт нерівномірності;

$\eta=0,55$ – коефіцієнт використання світлового потоку.

Підставимо дані:

$$N = \frac{300 \cdot 24 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{3200 \cdot 0,55}$$

Обчислюємо:

$$300 \cdot 24 = 7200,$$

$$7200 \cdot 1,5 \cdot 1,1 = 11880,$$

$$3200 \cdot 0,55 = 1760.$$

Отже,

$$N = \frac{11880}{1760} \approx 6,75$$

Приймаємо ціле значення:

$$N=7 \text{ світильників.}$$

Таким чином, для забезпечення нормативної освітленості 300 лк у приміщенні площею 24 м^2 доцільно встановити $7 \text{ LED-світильників}$ зі світловим потоком 3200 лм кожний. Це забезпечить безпечні та комфортні умови праці під час роботи з електричними схемами, комп'ютером і вимірювальним обладнанням.

4.6.2 Розрахунок необхідного повітрообміну

Прийmemo, що дослідницьке приміщення має:

довжину $A=6$ м,

ширину $B=4$ м,

висоту $H=3$ м.

Тоді об'єм приміщення [31]:

$$V = A \cdot B \cdot H = 6 \cdot 4 \cdot 3 = 72 \text{ м}^3 \quad (4.6)$$

Для приміщення з електронним обладнанням, комп'ютерною технікою та помірними тепловиділеннями прийmemo кратність повітрообміну:

$$n = 3 \text{ год}^{-1}$$

Тоді необхідна продуктивність вентиляції:

$$L = n \cdot V = 3 \cdot 72 = 216 \text{ м}^3/\text{год} \quad (4.7)$$

Отже, мінімально необхідний повітрообмін становить:

$$L = 216 \text{ м}^3/\text{год}$$

Для практичної реалізації доцільно прийняти стандартну вентиляційну установку з продуктивністю не менше 220–250 м³/год.

Отже, для забезпечення нормативного мікроклімату в приміщенні, де проводяться роботи з електромобільним електрообладнанням, необхідно передбачити механічну вентиляцію з продуктивністю не менше 216 м³/год. Це дозволить зменшити теплове навантаження, підтримувати допустиму температуру повітря та підвищити комфортність праці.

Висновки до розділу 4

У результаті проведеного аналізу встановлено, що основними небезпечними факторами при експлуатації систем електромобільного транспорту є електромагнітні випромінювання, висока напруга, теплові навантаження, шум і вібрації.

Запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на: зниження рівня електромагнітних завад; підвищення електробезпеки; забезпечення пожежної безпеки; покращення умов праці.

Виконані розрахунки підтверджують доцільність застосування комплексу технічних заходів з охорони праці, що включає улаштування захисного заземлення, забезпечення нормативного освітлення, організацію достатнього повітрообміну та оснащення приміщення первинними засобами пожежогасіння. Запропоновані рішення спрямовані на підвищення безпеки персоналу при роботі з високовольтними та електронними системами електромобільного транспорту.

Реалізація зазначених заходів дозволяє підвищити рівень безпеки персоналу та забезпечити відповідність систем електромобільного транспорту вимогам нормативних документів.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено дослідження електромагнітної сумісності в системах електромобільного транспорту, що є актуальною задачею у зв'язку з широким впровадженням силової електроніки та високочастотних перетворювальних пристроїв.

У результаті виконаної роботи отримано такі основні результати.

У першому розділі проведено аналіз проблеми електромагнітної сумісності в електромобільному транспорті. Встановлено, що основними джерелами електромагнітних завад є інвертори тягового електроприводу, DC/DC перетворювачі, системи заряджання та комутаційні процеси в силових напівпровідникових приладах. Показано, що завади поширюються як провідними, так і випромінюваними каналами, а їх вплив призводить до збоїв у системах керування, датчиках і цифрових мережах транспортного засобу. Виконано аналіз нормативної бази, зокрема стандартів CISPR та ISO, що регламентують допустимі рівні електромагнітних завад.

У другому розділі розроблено математичну та імітаційну модель процесів формування та поширення електромагнітних завад у системі електроприводу електромобіля. Побудовано модель у середовищі MATLAB/Simulink, яка враховує вплив імпульсної комутації, спектральні характеристики сигналів та паразитні параметри елементів. Проведене моделювання дозволило оцінити рівень завад у різних режимах роботи та визначити критичні діапазони частот, у яких спостерігається максимальний вплив на систему.

У третьому розділі розроблено методи забезпечення електромагнітної сумісності, що включають застосування LC- та ЕМІ-фільтрів, оптимізацію топології електричних з'єднань, екранування та використання алгоритмічних методів зниження завад. Виконано розрахунок параметрів фільтрів та побудовано імітаційну модель їх роботи. Результати моделювання показали, що застосування комбінованого ЕМІ-фільтра дозволяє суттєво знизити рівень

високочастотних завад і забезпечити відповідність вимогам стандартів електромагнітної сумісності. Порівняльний аналіз сигналів до та після фільтрації підтвердив ефективність запропонованих рішень.

У четвертому розділі розглянуто питання охорони праці при роботі з системами електромобільного транспорту. Проаналізовано основні небезпечні та шкідливі фактори, зокрема електромагнітне випромінювання, високу напругу, теплові навантаження та шум. Обґрунтовано заходи щодо забезпечення електробезпеки, пожежної безпеки та ергономічних умов праці. Виконано інженерні розрахунки захисного заземлення, освітлення та вентиляції, що підтверджують можливість забезпечення безпечних умов праці при експлуатації електротехнічного обладнання.

Загалом результати роботи свідчать про те, що застосування комплексного підходу до забезпечення електромагнітної сумісності, який поєднує конструктивні, схемотехнічні та алгоритмічні методи, дозволяє підвищити надійність і безпеку функціонування систем електромобільного транспорту.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розроблених моделей і методів при проектуванні та модернізації електроприводів електромобілів з метою зниження рівня електромагнітних завад та підвищення якості роботи електронних систем.

Результати роботи апробовано на IV ВСЕУКРАЇНСЬКІЙ НАУКОВО-ПРАКТИЧНІЙ КОНФЕРЕНЦІЇ «ЕНЕРГЕТИКА КРІЗЬ ПРИЗМУ ЧАСУ: ІСТОРИЧНА СПАДЩИНА ТА СТРАТЕГІЇ ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ» – Секція 1. Технологічний прорив: від механічних систем до цифрової інженерії та робототехніки – 14 ТРАВНЯ 2026 – ВСП «Бурштинський енергетичний фаховий коледж ІВАНО-ФРАНКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ НАФТИ І ГАЗУ» [36].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. International Electrotechnical Commission. *EMC – Electromagnetic compatibility*. <https://iec.ch/emc>
2. ISO. *ISO 11452-1:2025 Road vehicles – Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy – Part 1: General principles and terminology*. <https://www.iso.org/standard/83225.html>
3. Zhao, H., Wang, X., Wang, Z. *Study of EMC Problems with Vehicles*. In: *Electromagnetic Compatibility and Design*. Springer, 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-53932-9_16
4. Zhai, L., Lin, L., Zhang, X., Song, C. *The Effect of Distributed Parameters on Conducted EMI from DC-Fed Motor Drive Systems in Electric Vehicles*. *Energies*, 2017, 10(1), 1. <https://doi.org/10.3390/en10010001>
5. Tan, R., Ye, S., Yu, C., Deng, C., Zhou, A. *Research on Electromagnetic-Radiated Emission of Multi-in-One Electric Drive System*. *World Electric Vehicle Journal*, 2021, 12(3), 127. <https://doi.org/10.3390/wevj12030127>
6. Hu, Y., Lei, X., Du, X., Ye, T., Song, H., Li, H. *A review on high-frequency electromagnetic interference induced by power electronics in new electric power systems*. *Global Energy Interconnection*, 2025, Vol. 8, Issue 5, pp. 804–820. DOI: 10.1016/j.gloi.2025.05.011. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096511725001033>
7. Afonso, J. L., Monteiro, V., Pinto, J. G., Azevedo, G. M. S. *A Review on Power Electronics Technologies for Electric Mobility*. *Energies*, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13236343>
8. Tan, R., Ye, S., Peng, Q., Du, C., Zhou, Z. *Research on Efficient Prediction and Suppression of Electromagnetic Interference in Electric Drive Systems*. *World Electric Vehicle Journal*, 2025, 16(4), 201. <https://doi.org/10.3390/wevj16040201>

9. Dar, Aamir Rashid; Ahmad, Farooq; Tariq, Muhammad; Ahmad, Arif; Iqbal, Aamir; Al-Hitmi, Mohammed A. *On-Board Chargers for Electric Vehicles: A Comprehensive Review*. *Energies*, 2024, Vol. 17, Issue 18, Article 4534. <https://doi.org/10.3390/en17184534>
10. McDonald, B. *Addressing EMI Conducted Emissions Challenges in Electric Vehicles with GaN-Based On-Board Chargers*. Application Report SLYT831. Texas Instruments, 2020. Available at: <https://www.ti.com/lit/an/slyt831/slyt831.pdf>
11. Zhou, K.; Ding, X.; Xu, Z. *Research on modeling and prediction method of conducted electromagnetic interference for electric vehicle on-board charging system*. *Integration*, 2025, 101, Article 102339. <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2024.102339>
12. Zhang, C., Jasni, J., Mohd Radzi, M. A., Azis, N., He, X. *Research and analysis of electromagnetic interference of a motor drive control system based on PMSM with SiC MOSFET for new energy electric vehicles*. *Frontiers in Energy Research*, 2024, 11:1338212. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1338212>
13. Widek, P., et al. *Methods for the Investigation and Mitigation of Conducted EMI in the Development Process of Electric Vehicles*. *Energies*, 2025. <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/4/859>
14. Zhai, L., Cao, Y., Lin, L., Zhang, T., Kavuma, S. *Mitigation Conducted Emission Strategy Based on Transfer Function from a DC-Fed Wireless Charging System for Electric Vehicles*. *Energies*, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11030477>
15. IEC. *CISPR 25:2021 Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers*.
16. Wang, Q.; An, Z.; Zheng, Y.; Yang, Y. *Parameter extraction of conducted electromagnetic interference prediction model and optimisation design for a*

- DC–DC converter system*. IET Power Electronics, 2013. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0001>
17. International Electrotechnical Commission. *EMC Product Standards*. <https://www.iec.ch/emc-product-standard>
18. Sterniczuk, D.; Zaklika, W.; Kozłowski, M. *Identification Tests of Modern Vehicles' Electromagnetic Environment as Part of the Assessment of Their Functional Safety*. Sensors, 2025, 25(1), 7. <https://doi.org/10.3390/s25010007>
19. Sapkal, A. M.; Yadav, B. K. *Impact of Electromagnetic Interference on the Reliability of Automotive Electronic Systems in Electric Vehicles*. October 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/396376026_Impact_of_Electromagnetic_Interference_on_the_Reliability_of_Automotive_Electronic_Systems_in_Electric_Vehicles
20. Yan, Z.; Yu, H.; Leng, Z.; Yao, Y.; Zhao, X.; Wang, Z. *Comprehensive interference estimation and correction methods based on Unscented Kalman Filter for magnetic anomaly detection*. Measurement, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117859>
21. International Organization for Standardization *ISO 11452-1:2025 Road vehicles – Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy – Part 1: General principles and terminology*. ISO, 2025. <https://www.iso.org/standard/83225.html>
22. International Electrotechnical Commission. *Basic EMC publications*. <https://www.iec.ch/basic-emc-publications>
23. Robles, E., et al. *Advanced power inverter topologies and modulation techniques for common-mode voltage and leakage current mitigation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212100040X>
24. Закон України «Про охорону праці» : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>

- 25.НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-05>ДСТУ EN ISO 12100:2014.
- 26.Безпечність машин. Загальні принципи конструювання. Оцінка ризику та зниження ризику. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=61328
- 27.ДСанПіН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>
- 28.НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0011-98>
- 29.НПАОП 40.1-1.07-01. Правила експлуатації електрозахисних засобів. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1237-01>
- 30.ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
- 31.ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0426->
- 32.ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ : Мінрегіон України, 2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0028858-18>
- 33.ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
- 34.НАПБ А.01.001-04. Правила пожежної безпеки України.
- 35.НАПБ Б.01.008-2004. Правила експлуатації вогнегасників.
- 36.Кучинський В. С., Камнєв О. О., Розінков І. О. ІНТЕГРАЦІЯ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ В ЕНЕРГОСИСТЕМУ МІСТА: ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ ТА ТЕПЛОВІ РЕЖИМИ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ // ІV ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ЕНЕРГЕТИКА КРІЗЬ ПРИЗМУ ЧАСУ: ІСТОРИЧНА СПАДЩИНА ТА СТРАТЕГІЇ ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ». Секція 1. Технологічний прорив: від механічних

систем до цифрової інженерії та робототехніки. 14 ТРАВНЯ 2026. - ВСП
«Бурштинський енергетичний фаховий коледж ІВАНО-
ФРАНКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ НАФТИ І ГАЗУ».

[https://drive.google.com/drive/folders/1G1Y9DdeY_3--
mzS_R34WZCXADiusV58p](https://drive.google.com/drive/folders/1G1Y9DdeY_3--mzS_R34WZCXADiusV58p)