



Прийнято 08.05.2026. Прорецензовано 14.05.2026. Опубліковано 30.05.2026.

УДК 629.331-83:537.8:614.875

DOI: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-33-41

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛЕЙ

Кравцов М. М.

Кандидат технічних наук, доцент

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

61002, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-3218-2182>

e-mail: super-mikvich@ukr.net

Анотація. У роботі розглянуто основні джерела електромагнітного випромінювання низькочастотного та середньочастотного спектрів, серед яких особливу увагу приділено силовим кабелям високої напруги, тяговим інверторам, електродвигунам, перетворювачам постійного струму, зарядним модулям, а також елементам інформаційно-розважальних систем та бездротових інтерфейсів зв'язку. Проаналізовано особливості формування електромагнітних полів у різних режимах експлуатації автомобіля, включаючи запуск електроприводу, інтенсивне прискорення, рівномірний рух, рекуперативне гальмування та заряджання акумуляторної батареї. Встановлено, що найбільші значення магнітної індукції спостерігаються під час режимів із високими струмовими навантаженнями, насамперед у моменти швидкого розгону транспортного засобу. На основі аналізу експериментальних вимірювань та результатів комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів (Finite Element Method, FEM) визначено просторовий розподіл магнітного поля в салоні автомобіля та поблизу силових вузлів. Показано, що за певних умов рівень магнітної індукції може досягати пікових значень до 35 мГс (3,5 мкТл), що потребує врахування при проектуванні транспортних систем нового покоління. У роботі здійснено порівняльний аналіз чинних вітчизняних та міжнародних нормативних документів, які регламентують допустимі рівні електромагнітного випромінювання для людини, зокрема СанПіН, рекомендацій ICNIRP та стандартів EN IEC 62764–1. Визначено відмінності у підходах до оцінювання електромагнітної безпеки, методів вимірювання та гранично допустимих рівнів впливу. Особливу увагу приділено питанням впливу тривалого перебування людини в умовах дії слабких низькочастотних магнітних полів, що є характерними для електромобілів та гібридного транспорту. Запропоновано комплекс інженерних рішень для зниження рівня електромагнітного випромінювання та підвищення електромагнітної сумісності транспортних систем.

Ключові слова: електромобілі та гібридні автомобілі; електромагнітне випромінювання; магнітне поле наднизької частоти; електромагнітна сумісність; питомий коефіцієнт поглинання; електромагнітне екранування; метод скінчених елементів; безпека пасажирів і водія; стандарти ICNIRP.

Вступ

Сучасні системи електросилових установок і передачі інформації гібридних/ електромобілів максимально наближені до

водія і пасажирів. Автомобіль, буквально, напханий різними видами електрообладнання. Кількість джерел ЕМВ, що впливають на водія і пасажирів, врахувати не мо-

Запропоноване посилання: Кравцов, М. М. (2026). Методика оцінювання електромагнітного випромінювання електричних та гібридних автомобілей. *Методи та прилади контролю якості*, 1(56), 33-41. doi: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-33-41

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

жливо. У процесі роботи електро- та гібридні автомобілі створюють навколо себе поля з широким частотним спектром та просторовим розподілом, такі як: електростатичне поле; змінні низькочастотні електричні поля; змінні низькочастотні магнітні поля. Електромобілі використовують потужну електроніку для керування електричним двигуном, що виробляє низькочастотні електромагнітні перешкоди високого рівня.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

В статті [1] аналіз та розрахунки продемонстрували значну конвергенцію в корисності запропонованих методів оцінки електромагнітної стійкості (ЕМС) у моторних транспортних засобах. Забезпечення високоякісних параметрів, що впливають на оцінку, насамперед електромагнітного випромінювання (ЕМВ), впливає не лише на належну експлуатацію транспортного засобу, особливо електромобілів, але й на здоров'я пасажирів і водія. Результати цієї роботи можуть бути використані та поширені, зокрема, конструкторами та дослідниками моторних транспортних засобів, особливо електромобілів, які містять велику кількість електронних систем та модулів.

Досліджувані компоненти електромагнітних полів (ЕМП) [2] які окремо відповідають обмеженням, встановленим міжнародним трудовим законодавством та рекомендаціями щодо оцінки короткочасного впливу на людину, однак потребують уваги інші питання – електромагнітна стійкість (ЕМС) електронних пристроїв та тривалий вплив на людину. Найсильніше електромагнітне поле (ЕМП) було виявлено поблизу зарядних установок постійного струму допустимого стану (ДС) та статичного магнітного поля (СМП) до 0,2 мТл та магнітне поле надзвичайно низької частоти (ННЧ) до 100 мкТл – та всередині електромобілів – до 30 мкТл поблизу їхнього внутрішнього електрообладнання. Було виявлено та визнано, що вплив радіочастотних електромагнітних полів (РЧ-ЕМП) всередині електромобілів (до кількох В/м) випромінюється зовнішніми радіокомуні-

каційними системами разом із випромінюванням від джерел, що використовуються всередині транспортних засобів, таких як пасажирські мобільні телефони та антени Wi-Fi-маршрутизаторів.

У статті [3] створені моделі для антени GPS (спеціалізовані пристрої, призначені для прийому слабких радіосигналів від супутників, що знаходяться на середній навколоземній орбіті (близько 20-200 км)„ електромобіля та людського тіла. За допомогою багатofізичного розрахунку зв'язку полів у COMSOL Multiphysics, програмному забезпеченні для моделювання методом скінченних елементів, як у частотній області, так і в перехідному аналізі, ми отримуємо розподіл напруженості електричного поля, питомий коефіцієнт поглинання та розподіл температури тіла людини у трьох положеннях всередині електромобіля після 30-хвилинного впливу випромінювання антени глобальної системи позиціонування GPS. Пікове електричне поле, індуковане людиною, становить 18,4 В/м, а піковий питомий коефіцієнт поглинання – 0,193 Вт/кг. Середнє максимальне значення індукованого людиною електричного поля за 30 хвилин становить 1,6906 В/м, що становить 3,1% від граничного значення ICNIRP (Міжнародна комісія із захисту від неіонізуючого випромінювання), середнє значення питомого коефіцієнта поглинання всього тіла за 30 хвилин становить 0,0036 Вт/кг, що становить 4,5% від граничного значення ICNIRP, а середнє підвищення температури ядра людини за 30 хвилин становить 0,06°C, що становить 6% від граничного значення ICNIRP. Крім того, ми моделюємо вплив трьох різних матеріалів корпусу автомобіля на рівень електромагнітного впливу на організм людини, що може слугувати орієнтиром для проектування електромагнітного екранування в автомобілях. Результати показують, що напруженість індукованого електричного поля, питомий коефіцієнт поглинання (SAR) та підвищення температури в різних частинах тіла людини не перевищували стандартні граничні значення в останній версії ICNIRP.

Транспортні засоби, оснащені електричними силовими агрегатами, потребують значної електричної потужності (близько 5–200 кВт, залежно від типу транспортного засобу [4] для розподілу по транспортному засобу між бортовими джерелами живлення (накопичуваними або генерованими) та електричними машинами. Враховуючи обмеження розміру та простору транспортних засобів, пасажирів, ймовірно, перебуватимуть відносно близько до компонентів електричної силової установки, включаючи потужні електричні машини, інвертори та інші системи силової електроніки, а також високовольтні силові кабелі. Таким чином, зростання використання електричних силових агрегатів для транспортних засобів, а також пов'язаних з ними технологій, таких як бездротова зарядка тягових акумуляторів, робить оцінку впливу магнітного поля в транспортних засобах дедалі важливішою.

В електромобілях [5] пасажирів сидять дуже близько до електричної системи значної потужності, зазвичай протягом значного часу. Відносно високі струми, що досягаються в цих системах, і короткі відстані між силовими пристроями та пасажирів означають, що останні можуть піддаватися впливу відповідних магнітних полів. Це означає, що виникає необхідність оцінити електромагнітне середовище в салоні цих транспортних засобів перед їх випуском на ринок. Крім того, під час проектування електромобілів та їх компонентів необхідно враховувати небезпеку впливу магнітних полів. Для цієї мети інструменти оцінки, засновані на моделюванні методом скінченних елементів, можуть виявитися дуже корисними. За допомогою відповідних рекомендацій щодо проектування можна зробити електромобілі безпечними з точки зору електромагнітного випромінювання.

Електричні та магнітні поля присутні скрізь [6], де проходить електрика. В електромобілях пасажирів сидять дуже близько до електричної системи зі значною потужністю, зазвичай протягом значного періоду часу. Відносно високі струми, що досягаються в цих системах, і коротка відстань

між силовими пристроями та пасажирів означають, що останні піддаються впливу відповідних магнітних полів. З огляду на це важливо вивчити значення параметрів електромагнітного поля на борту електромобілів, щоб забезпечити сумісність з міжнародними стандартами. Вимірювання проводилися всередині чотирьох звичайних транспортних засобів за стандартних умов. Наведено дані міжнародних та болгарських стандартів щодо безпечних рівнів електромагнітних полів. Після вимірювань було встановлено, що ці рівні не були перевищені.

Стаття [7] містить детальний аналіз стану існуючих відповідних стандартів та їх наукової основи. Крім того, вона пропонує перспективний погляд на майбутні тенденції розвитку індустрії електромагнітної безпеки людини, досліджуючи, як технологічні інновації та політичні рекомендації можуть ефективно захищати здоров'я населення та сприяти безпечному та ефективному застосуванню технології бездротової передачі енергії.

Автомобіль, будучи засобом пересування людини, все більше і більше насичується електронними та електричними пристроями [8], які позначаються на здоров'ї людини негативний вплив. В автомобілі електромагнітні поля (ЕМП) створюються електрообладнанням. Встановлено, що рівні індукції магнітного поля (МП) істотно залежать від режиму експлуатації автомобіля. Особливо сильні варіації магнітних полів спостерігаються при розгоні і гальмуванні автомобіля. Вплив на здоров'я впливу вкрай низької частоти (ELF, діапазон частот від 0 до 100 кГц впливу магнітного поля (MF) в EV і HEV викликало стурбованість громадськості. Вплив магнітних частот (МЧ) неминуче в компактній металевій кабіні, а розподіл внутрішнього поля дуже складно. ELF MF (це магнітні поля наднизької частоти, що зазвичай охоплюють діапазон від 3 Гц до 3 кГц). Вплив, певне Міжнародним агентством з дослідження раку (IARC) як можливо канцерогенна для людини, тісно пов'язане із захворюваністю на лейкемію. Опорні рівні щільності магнітного потоку зазвичай зменшуються

за частотою (наприклад, від 0,625 мТл до 0,2 мТл для 8 Гц до 25 Гц, 0,2 мТл для 25 Гц до 400 Гц, 0,2 мТл до 0,0267 мТл для 400 Гц до 3000 Гц). Ці рекомендації були засновані головним чином на короткострокових ефектах.

Методологічною основою роботи [9] є узагальнення та аналіз відомих наукових результатів з організації системи випробувань, розробки й застосування критеріїв ефективності, раціональне поєднання теоретичних і експериментальних досліджень, використання системного підходу. Об'єктом дослідження є матеріали й методи захисту від електромагнітного випромінювання електричних і гібридних транспортних засобів на етапі експлуатації, що мінімізують векторний критерій якості в залежності від зовнішніх умов. Надана концепція моделювання та оптимізації електромагнітної небезпеки гібридних і електромобілів, що має єдиний підхід до дослідження індукованої напруги магнітного поля. Особлива увага приділена оцінці частотного спектра електромагнітного забруднення, що охоплює як низькі частоти (характерні для інверторів), так і високочастотний шум (випромінювання електродвигунів). Проведення випробувань у реальних умовах експлуатації дозволило врахувати вплив змінних факторів, таких як температура, вологість і особливості дорожніх умов.

Дослідження останніх років [10] показують, що сучасний автомобіль є джерелом електромагнітної небезпеки. Відсоток електромагнітного поля (ЕМП) від автомобільного транспорту в містах значно зріс як внаслідок збільшення транспортного потоку, так і збільшення кількості і потужності електрообладнання сучасного автомобіля.

Система керування та основні вузли гібридного/електричного автомобіля

Електростатичне поле виникає за рахунок наявності електростатичного потенціалу (прискорювальної напруги) в силовій установці гібридного/електромобіля. При цьому з'являється різниця потенціалів між енергетичною установкою автомобіля та водієм і пасажиром. Електростатичне по-

ле навколо водія і пасажирів залежить не тільки від полів, створюваних енергетичною установкою, але також від різниці потенціалів між водієм і пасажиром та навколишніми і додатковими системами. Ця різниця потенціалів виникає, коли заряджені частинки накопичуються на тілі в результаті поїздки при терті матеріалів одягу о сидіння автомобіля тощо. Електромагнітне поле (ЕМП) – це особлива форма матерії, за допомогою якої здійснюється взаємодія між зарядженими частинками. Джерелами змінних електричних і магнітних полів у гібридних/електромобілів є вузли, в яких є висока змінна напруга, і вузли, що працюють з більшими струмами. Типові просторові розподіли змінного магнітного поля та змінного електричного поля навколо гібридного/електромобіля показані на рис. 1.



Рисунок 1 – Система керування та основні вузли гібридного/електричного автомобіля

Кожен із цих елементів є частиною складної мережі електронного та механічного обладнання сучасного транспортного засобу: 1 – блок-фара (Headlight Assembly): система головного освітлення, що включає лампи ближнього/дальнього світла, покажчики повороту та габаритні вогні. 2 – Кронштейн шасі/важіль (Chassis Bracket): елемент силової структури підвіски, що забезпечує кріплення ходової частини до кузова. 3 – модуль керування двигуном/електронікою (Engine/Electronics Module): «Мозок» автомобіля, що контролює впрскування палива, запалювання та діагностику систем. 4 – компонент системи керування (Steering System Component): елементи рульового приводу (тяги, наконечники), що передають зусилля від керма до

коліс. 5 – додатковий інформаційний дисплей: панель над торпедо для відображення допоміжних даних (парктронік або стан систем). 6 – мультимедійний монітор (Navigation/Media Monitor): центральний екран для керування навігацією та інформаційно-розважальними функціями. 7 – сабвуфер (Subwoofer Box): спеціалізований динамік для відтворення низьких частот, зазвичай розташований у багажнику. 8 – підсилювач потужності (Power Amplifier): пристрій для посилення звукового сигналу акустичної системи автомобіля. 9 – дверний динамік (Door Speaker): компонент аудіосистеми для відтворення середніх та високих частот. 10 – інтелектуальне сидіння (Smart Seat): крісло з вбудованими елементами комфорту (підігрів, позначений помаранчевим, вентиляція та електроприводи). 11 – відкидний монітор (Flip-down Monitor): стельовий або закріплений на підголівнику екран для пасажирів заднього ряду.

Даний рисунок наочно демонструє високу щільність електрифікації з точки зору інженерного аналізу, це важливо з двох причин: електромагнітна сумісність (ЕМС): велика кількість споживачів енергії (підсилювачі, монітори, приводи сидінь) вимагає ретельного екранування кабелів для запобігання перешкодам. Безпека пасажирів: кожен електричний вузол, особливо ті, що розташовані близько до людини (сидіння, монітори), створює локальні магнітні поля, рівень яких має відповідати нормам безпеки [8].

Розрахункові характеристики електромагнітного випромінювання електричних та гібридних автомобілів

По частотному спектру електромагнітні поля в електричних та гібридних автомобілях поділяються на дві групи:

- поля, створювані блоком живлення силової установки та тягової акумуляторної батареї (основний енергетичний спектр цих полів зосереджений у діапазоні частот до 1 кГц);

- поля, створювані блоком інформаційних систем (енергетичний спектр зосереджений у діапазоні частот від 15 до 100 кГц).

Електромагнітні поля, породжені сторонніми джерелами, називаються фоновими полями. Просторова діаграма розподілу інтенсивності електричного поля навколо гібридного/електромобіля показано на рисунку 2.

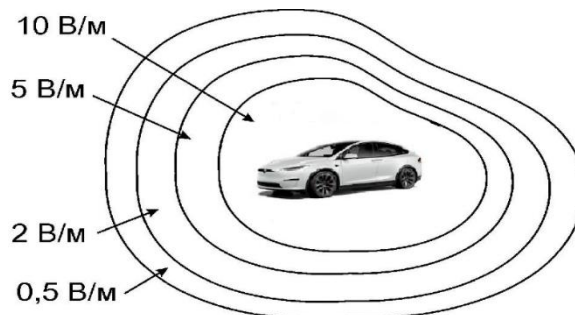


Рисунок 2 – Просторова діаграма розподілу інтенсивності електричного поля навколо гібридного/електричного автомобіля

Характер цих полів, їх просторовий розподіл та рівні визначаються фізичними особливостями джерел, становищем їх по відношенню до водія та пасажирів. Основне джерело фонових полів – це мережа електроживлення силової установки гібридного/електромобіля та інформаційних систем. Електромобіль спеціально розрахований на міську експлуатацію. Незважаючи на те, що він взагалі не забруднює навколишнє середовище, ситуація з електромагнітними джерелами в електромобілі є значно складнішою, ніж в автомобілі, оснащеному двигуном внутрішнього згоряння. У електромобілі електромагнітні поля з високою щільністю енергії мають шкідливий вплив безпосередньо на організм людини. Vedholm і Hamerius [10] провели вимірювання магнітного поля (5-2000 Гц) в нерухомому гібридному електромобілі з включеним двигуном і кондиціонером. Виміри проводилися в 7 автомобілях в районі всіх чотирьох сидінь на рівні щиколоток, колін, стегон, грудей і голови. Так як автомобілі були нерухомі, поля, генеровані обертанням коліс, були відсутні.

У гібридах, в яких батарея була розміщена спереду (Авто 1-5), при відсутності руху наспостерігалися маленькі поля. Сильні поля спостерігалися в автомобілях,

Таблиця 1 – Середнє магнітне поле (мкТл) в діапазоні частот (5-2000 Гц) у нерухомому гібридному автомобілі з включеним двигуном і кондиціонером

Точка вимірювання	Авто 1	Авто 2	Авто 3	Авто 4	Авто 5	Авто 6	Авто 7
Ліве переднє сидіння	0,12	0,11	0,15	0,22	0,14	2,6	3,2
Праве переднє сидіння	0,13	0,15	0,33	0,37	0,11	1,1	0,8
Ліве заднє сидіння	0,06	0,04	0,03	0,03	0,06	2,4	4,0
Праве заднє сидіння	0,11	0,10	0,04	0,04	0,03	1,3	1,5

в яких батарея була розміщена ззаду (Авто 6 і 7). У цих автомобілях батарея розташована під багажником або під заднім сидінням, і струм тече через весь автомобіль з передньої частини, від генератора до батареї. Такий великий струмовий контур генерує значні магнітні поля. Максимальне поле 15 мкТл (Авто 7) було визначено у заднього правого сидіння (як правило, дитячого) на рівні ніг.

Під час руху магнітного поля (МП) на дитячому сидінні було в межах 0,1–3 мкТл. МП в інших вимірних точках мало приблизно такий же рівень. Було отримано, що в гібридних автомобілях генерується суміш МП в частотному діапазоні 5–500 Гц. Треба зауважити, що в даному дослідженні вимірювальні прилади не фіксували МП нижче 5 Гц.

В роботі дослідників [6] наведені результати вимірювань МП в різних точках гібридного автомобіля. Було знайдено, що інтенсивність поля знаходиться в межах 0–35 мГс (0–3,5 мкТл). Максимальні поля вище 10 мГс спостерігалися на частоті 12 Гц. На рис. 3 показано МП, виміряне в задній частині гібридного автомобіля під час руху в різних режимах (прискорення, гальмування).

На графіку представлена залежність рівня магнітної індукції (вимірюється в мілігаусах, мГс) від часу під час руху транспортного засобу. Рисунок демонструє динаміку зміни електромагнітного фону в салоні в різних режимах експлуатації. Режим прискорення (05:55 PM – 06:01 PM): на цій ділянці спостерігається поступове зростання амплітуди коливань магнітного поля. Найбільший сплеск (пік) зафіксовано близько 06:01 PM, де значення сягає приблизно 35 мГс. Це пояснюється різким зростанням сили струму, що протікає через силові кабелі та електродвигун для забезпечення крутного моменту. Стабільний рух / перехідний етап (06:01 PM – 06:03 PM): після пікового прискорення рівень поля дещо стабілізується на високих значеннях (близько 20–25 мГс), що характерно для підтримання високої швидкості. Режим гальмування (після 06:03 PM): під час гальмування (зокрема, при рекуперативній енергії) спостерігається поступове зниження загального рівня магнітної індукції. Проте графік залишається "порізаним", що свідчить про роботу системи перетворення енергії та переривчастий характер гальмівних зусиль. До 06:10 PM рівень поля повертається до мінімальних значень (близько 2–5 мГс). Таким чином: кореляція зі струмом: графік підтверджує пряму залежність між споживаною потужністю (режим прискорення) та інтенсивністю магнітного поля в салоні. Безпека пасажирів: пікові значення у 35 мГс (3,5 мкТл) є важливим показником для порівняння з гранично допустимими рівнями за стандартами ICNIRP або державними санітарними нормами. Частотний характер: висока осциляція (нерівномірність) кривої вказує на наявність гармонік низької частоти, які виникають під час роботи інверторів та частотних перетворювачів [9].

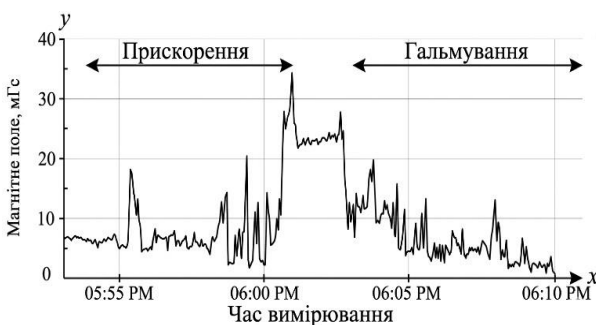


Рисунок 3 – Магнітні поля на задньому сидінні гібридного автомобіля

Таблиця 2 – Тимчасові допустимі рівні ЕМП, створювані системами

Найменування параметрів		ГРД (гранично допустимий рівень)
Напруженість електричного поля	у діапазоні частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	у діапазоні частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Щільність магнітного потоку	у діапазоні частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	у діапазоні частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Напруженість електростатичного поля		15 В/м

Нормування параметрів електромагнітних полів

Нормування параметрів електромагнітного поля (ЕМП) здійснюється з урахуванням можливості одночасного впливу на водія та пасажирів усіх перелічених вище фізичних факторів. Тимчасові допустимі рівні ЕМП, створюваних системами гібридних/електромобілів на водія та пасажирів, згідно з СанПіН 2.2.2/2.4.1340-03.

Згідно до вимог стандарту EN IEC 62764 – 1:2022 “Методи вимірювання рівнів магнітного поля створюваного електричним та електронним обладнанням автомобілів щодо впливу на людину”. Частина 1. Низькочастотні поля. Гранично допустима доза згідно до цього стандарту електромагнітного випромінювання для людини перебуває в межах 0,2–0,3 мкТл. Кожна людина використовує електричний і гібридний види транспорту, наприклад як тролейбуси, трамваї, метро та інші види. Електричні та гібридні автомобілі є джерелом електромагнітного випромінювання величиною до 100 мкТл. Водії та пасажирів, які перебувають у салонах, безпосередній близькості до електронних та електричних компонентів цих транспортних засобів, піддаються впливу негативному електромагнітному випромінюванню, що в 500 разів перевищує допустиме значення [10].

Висновки

1. На відміну від автомобілів з ДВЗ, електричні та гібридні авто мають потужні силові компоненти (тягові акумулятори, інвертори, електродвигуни), що генерують інтенсивні магнітні поля низької та середньої частоти. Основними критичними зонами є простір над силовими кабелями під підлогою та поблизу моторного відсіку.

2. Методи оцінювання повинні враховувати нестаціонарність полів. Експериментальні дані показують, що рівень магнітної індукції прямо залежить від споживаної потужності: пікові значення (до 35 мГс і вище) фіксуються під час інтенсивного прискорення та рекуперативного гальмування. При стабільному русі рівень поля знижується, але залишається вищим за фонові значення через роботу допоміжної електроніки.

3. Оцінювання безпеки потребує диференційованого підходу до вибору норм: використання жорстких норм для робочих місць (ПДР 250 нТл для 5 Гц – 2 кГц) демонструє значні перевищення в салоні EV. При застосуванні міжнародних стандартів ICNIRP (граничне значення до 200 мкТл для 50 Гц) рівні випромінювання зазвичай залишаються в межах безпеки для загального населення, проте вимагають контролю для вразливих груп.

4. Для об'єктивної оцінки необхідно поєднувати два підходи: експериментальний: вимірювання в реальному часі за допомогою тривіальних датчиків магнітної індукції з прив'язкою до циклу руху. Розрахунковий: математичне моделювання (наприклад, метод скінченних елементів — FEM) для прогнозування розподілу полів ще на етапі проектування архітектури кабелів.

5. Основними методами мінімізації ЕМВ є раціональне компонування силових ліній (скручування фазних дротів), використання екрануючих матеріалів (зокрема спеціалізованих гнучких захисних матеріалів) та віддалення електронних компонентів комфорту від джерел високої напруги.

Подяки

Відсутні.

Конфлікти інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Бурлінський Р., Лук'ян С. Методи аналізу та оцінки електромагнітного випромінювання під час випробувань на електромагнітну сумісність (EMC) моторних транспортних засобів, зокрема електричних. *Архіви автомобільної техніки = Archiwum Motoryzacji*. 2018. Т. 80, № 2. С. 77–94. URL: <https://doi.org/10.14669/AM.VOL80.ART6>
2. Гріз К., Карпович Й., Зрадзинський П. Складні електромагнітні проблеми, пов'язані з використанням електромобілів у міському транспорті. *Датчики (Базель) = Sensors (Basel)*. 2022. Т. 22, № 5. Ст. 1719. URL: <https://doi.org/10.3390/s22051719>
3. Шан С., Лу М. Оцінка безпеки електромагнітного впливу навколишнього середовища для GPS-антени електромобіля. *Міжнародний журнал антен та поширення хвиль = International Journal of Antennas and Propagation*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1155/2024/3192747>
4. Раддл А. Р., Лоу Л. Оцінка впливу низькочастотного магнітного поля в гібридних та електричних транспортних засобах. 2014.
5. Морено-Торрес П., Лафос М., Бланко М., Аррібас Х. Р. Вплив магнітних полів на пасажирів в електромобілях. 2016. URL: <https://doi.org/10.5772/64434>
6. Христов Р., Стефанов С., Костов П. Дослідження електромагнітного поля в електричних та гібридних автомобілях. *Серія конференцій IOP: Матеріалознавство та інженерія = IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Т. 977, № 1. Ст. 012022. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/977/1/012022>
7. Лю Л., Гао Л. Бездротова передача енергії для електромобілів та електромагнітна безпека в організмі людини. 2025. Т. 5, № 8. URL: <https://doi.org/10.54691/rcdbtt58>
8. Яровий Є. В. Розробка методики вимірювання напруженості електромагнітного поля в салоні електромобіля : дипломна робота бакалавра. Харків, 2020. 59 с.
9. Бажинов О. В., Сауханов Н. С., Кравцов М. М., Таран І. О., Бажинова Т. О. Оптимізація електромагнітного випромінювання гібридних та електричних транспортних засобів. *Науковий вісник Національного гірничого університету = Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025. № 3. С. 107–118. URL: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-3/107>
10. Ускова С. Шляхи зменшення впливу електромагнітного випромінювання автомобільного транспорту. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі : матеріали І Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених / ТДАТУ. Мелітополь, 2021. С. 32. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/13588>*

References

1. Burliński, R., & Łukjan, S. (2018). Methods for the analysis and assessment of electromagnetic radiation during tests on electromagnetic compatibility (EMC) of motor vehicles, including electric ones. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*, 80(2), 77–94. <https://doi.org/10.14669/AM.VOL80.ART6> (in Ukrainian)
2. Gryz, K., Karpowicz, J., & Zradziński, P. (2022). Complex electromagnetic problems associated with the use of electric vehicles in urban transportation. *Sensors*, 22(5), Article 1719. <https://doi.org/10.3390/s22051719> (in Ukrainian)
3. Shang, S., & Lu, M. (2024). Safety assessment of electromagnetic environment exposure for electric vehicle GPS antenna. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2024, Article 3192747. <https://doi.org/10.1155/2024/3192747> (in Ukrainian)
4. Ruddle, A. R., & Low, L. (2014). Assessment of low-frequency magnetic field exposure in hybrid and electric vehicles. *MIRA Report*. (in Ukrainian)
5. Moreno-Torres, P., Lafos, M., Blanco, M., & Arribas, J. R. (2016). Influence of magnetic fields on passengers in electric vehicles. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/64434> (in Ukrainian)

6. Khristov, R., Stefanov, S., & Kostov, P. (2020). Investigation of electromagnetic field in electric and hybrid cars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 977(1), Article 012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/977/1/012022> (in Ukrainian)
7. Liu, L., & Gao, L. (2025). Wireless power transfer for electric vehicles and electromagnetic safety in human body. *Academic Journal of Science and Technology*, 5(8). <https://doi.org/10.54691/rcdbtt58> (in Ukrainian)
8. Yarovyi, Y. V. (2020). *Rozrobka metodyky vymiriuvannia napruzhenosti elektromahnitnoho polia v saloni elektromobilia* [Development of a methodology for measuring the electromagnetic field strength in the cabin of an electric vehicle] (Bachelor's thesis, Kharkiv). 1–59. (in Ukrainian)
9. Bazhynov, O. V., Saukhanov, N. S., Kravtsov, M. M., Taran, I. O., & Bazhynova, T. O. (2025). Optimization of electromagnetic radiation of hybrid and electric vehicles. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 107–118. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-3/107> (in Ukrainian)
10. Uskova, S. (2021). Shliakhy zmenshennia vplyvu elektromahnitnoho vyprominiuvannia avtomobilnoho transportu [Ways to reduce the impact of electromagnetic radiation from automobile transport]. In *Tekhnichne zabezpechennia innovatsiinykh tekhnolohii v ahropromyslovomu kompleksi* [Technical support of innovative technologies in the agro-industrial complex: Materials of the I International Scientific and Practical Conference of Young Scientists] (p. 32). TSATU. <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/13588> (in Ukrainian)

METHODOLOGY FOR ASSESSING ELECTROMAGNETIC RADIATION OF ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES

Kravtsov M. M.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Kharkiv National Automobile and Road University
61002, Yaroslava Mudryho St., 25, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3218-2182>
e-mail: super-mikvich@ukr.net

Abstract. The paper considers the main sources of electromagnetic radiation of the low-frequency and medium-frequency spectrums, among which special attention is paid to high-voltage power cables, traction inverters, electric motors, DC/DC converters, charging modules, as well as elements of infotainment systems and wireless communication interfaces. The features of the formation of electromagnetic fields in various modes of operation of the car are analyzed, including starting the electric drive, intensive acceleration, uniform movement, regenerative braking and charging the battery. It is established that the highest values of magnetic induction are observed during modes with high current loads, primarily during rapid acceleration of the vehicle. Based on the analysis of experimental measurements and the results of computer modeling using the Finite Element Method (FEM), the spatial distribution of the magnetic field in the car interior and near the power units is determined. It is shown that under certain conditions, the level of magnetic induction can reach peak values of up to 35 mG (3.5 μ T), which needs to be taken into account when designing new generation transport systems. The paper provides a comparative analysis of current domestic and international regulatory documents regulating permissible levels of electromagnetic radiation for humans, in particular SanPiN, ICNIRP recommendations and EN IEC 62764–1 standards. Differences in approaches to assessing electromagnetic safety, measurement methods and maximum permissible exposure levels are identified. Special attention is paid to the impact of prolonged exposure of humans to weak low-frequency magnetic fields, which are characteristic of electric vehicles and hybrid transport. A set of engineering solutions is proposed to reduce the level of electromagnetic radiation and increase the electromagnetic compatibility of transport systems.

Keywords: electric and hybrid vehicles; electromagnetic radiation; ultra-low frequency magnetic field; electromagnetic compatibility; specific absorption coefficient; electromagnetic shielding; finite element method; passenger and driver safety; ICNIRP standards.