

Куць Н.Г., Булік Ю.В., Дубицький О.С., Мазилук П.В.
*Луцький національний технічний університет***РАДІОТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА АВТОМОБІЛЯ**

В цій статті проведено короткий аналіз наукового напрямку «Радіотехнічна діагностика автомобіля». Радіотехнічна діагностика автомобіля - це метод технічного контролю стану автомобільних систем і вузлів, який базується на використанні радіохвиль (радіосигналів) для виявлення несправностей, дефектів або змін фізичних властивостей матеріалів без їх розбирання або демонтажу. Робочі теплові та електричні двигуни є джерелами інтенсивного електромагнітного випромінювання в радіодіапазоні. Це випромінювання модулюється за частотою та амплітудою як внутрішніми процесами формування радіовипромінювання, так і зовнішніми впливами. Використовуючи інтегральну, спектральну та кореляційну обробку складного радіосигналу, можна визначити основні параметри роботи двигунів, величину внутрішніх фрикційних зв'язків та характер зовнішнього впливу на рухомий транспортний засіб. Це дозволяє оцінити можливість подальшого використання транспортного засобу та здійснити його оптимальне управління.

Ключові слова: транспорт, двигун, радіовипромінювання, технічна діагностика, радіосигнал.

ВСТУП

Під час радіотехнічної діагностики за допомогою спеціальних пристроїв реєструють та аналізують відбиття, поглинання або випромінювання радіохвиль автомобільними елементами, щоб визначити їхній технічний стан. Зокрема, це може застосовуватися для діагностики металевих конструкцій (кузова, рами) на наявність корозії чи тріщин; електронних систем (радіолокаційне випромінювання для контролю роботи сенсорів, антен, систем допомоги водію); прихованих дефектів в обшивці або у внутрішніх порожнинах автомобіля.

Переваги радіотехнічної діагностики автомобіля полягають в безконтактності, високій точності, швидкості обстеження, безпечності, універсальності, доступу до важкодоступних зон. При радіотехнічній діагностиці транспортного засобу немає потреби розбирати або дефектувати деталі автомобіля, а дозволяє виявляти дрібні дефекти або зміни на ранніх стадіях затрачаючи значно менше часу, ніж традиційна діагностика [1]. Радіохвилі не шкодять матеріалам і не впливають на електроніку та підходить для діагностики металевих, пластикових і композитних елементів, обстежуючи внутрішні порожнини без розбирання. Обладнання та методи радіотехнічної діагностики використовують короткі імпульси радіохвиль для "просвічування" конструкцій автомобіля, що дозволяє виявляти тріщини, корозію під фарбою, приховані пошкодження; радіохвильові дефектоскопи працюють у мікрохвильовому діапазоні та використовуються для перевірки цілісності матеріалів кузова, особливо після аварій чи ремонту. Системи неруйнівного контролю на основі радіолокації працюють як маленькі радари: передають сигнал і аналізують його відбиття, виявляючи неоднорідності в шарах лакофарбового покриття, шпаклівки чи металу.

Радіометричні прилади вимірюють власне радіовипромінювання матеріалів і можуть оцінювати стан електронних систем, кабельних з'єднань, сенсорів. Інспекційні системи на основі Wi-Fi/5G-частот використовують зміну характеристик сигналу при проходженні через матеріали, визначаючи рівень вологості або мікро тріщини.

На практиці найчастіше застосовують такі методи для діагностики батарей електромобілів. Радіохвилі, проходячи через корпус батареї, відбиваються від внутрішніх елементів і аналізують відбитий сигнал, що можна визначити неоднорідності, дефекти, мікропошкодження або зміни в структурі осередків батареї без розбирання. Можна діагностувати перегрів або локальне підгоряння елементів, появу вологості або конденсату всередині батарейного модуля, розшарування чи механічні пошкодження осередків, втрату контактів або з'єднань всередині батареї, здуття окремих елементів, що призводить до зниження ємності або ризику займання.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМ

Радіотехнічна діагностика автомобіля є одним з новітніх напрямків у галузі автомобільної техніки, який ґрунтується на використанні радіохвиль та електромагнітного випромінювання для оцінки стану технічних вузлів транспортного засобу. Цей метод дозволяє безконтактно та ефективно отримувати інформацію про стан роботи двигунів, систем трансмісії, роботи електричної батареї, а також виявляти можливі неполадки, що виникають в реальному часі під час експлуатації автомобіля.

В рамках радіотехнічної діагностики автомобіля важливими аспектами є аналіз радіошуму, випромінюваного окремими вузлами та агрегатами транспортного засобу. За допомогою спеціальних

апаратних комплексів, що здатні вимірювати інтегральну потужність радіошуму та ідентифікувати характерні модуляції, можна визначити наявність внутрішніх дефектів та зовнішніх впливів на технічний стан автомобіля [2]. Ось деякі приклади обладнання для ранньої діагностики: мікрохвильові сканери спеціально для батарей; UWB-радары (ультраширокопasmові радары), які можуть бачити пошкодження на глибині кількох сантиметрів всередині батарейного блоку; радіохвильові томографи, які створюють "зрізи" батареї подібно до медичної томографії.

Більш детальну інформацію про технічний стан працюючих двигунів можна отримати за допомогою автокореляційної обробки сигналу. Автокореляційний аналіз радіошуму дає змогу визначити спектр амплітудних модуляцій. Для кожного двигуна спочатку отримують спектр амплітудних модуляцій, а потім заносять ці дані в довготривалу пам'ять бортового комп'ютера.

Вивчення сучасної літератури показує, що застосування радіотехнічних методів діагностики активно розвивається у багатьох галузях транспорту, зокрема в автомобільній техніці. Одним з основних напрямків є використання методів аналізу радіошуму для визначення технічного стану двигунів та інших критичних елементів автомобіля. Це дозволяє значно знизити витрати на діагностику та ремонт, а також підвищити безпеку експлуатації транспортних засобів [3].

Наукові роботи також відзначають важливість точного ідентифікування спектра модуляцій радіошуму, оскільки зміни в амплітудних і фазових характеристиках сигналу можуть свідчити про технічні несправності. Спектральний аналіз радіосигналів дозволяє виявляти навіть найменші відхилення, що можуть бути показниками дефектів в роботі вузлів автомобіля.

Основною проблемою, що виникає при застосуванні радіотехнічної діагностики в автомобільній промисловості, є необхідність розробки ефективних методів обробки та аналізу радіосигналів, що враховують специфіку роботи кожного типу автомобіля та його технічних систем [4]. Рішення цієї проблеми вимагає:

- розробки нових методів вимірювання та аналізу радіошуму для різних типів автомобільних двигунів та систем;
- створення апаратних комплексів, здатних до точного та швидкого виявлення відхилень у роботі технічних вузлів;
- розробки алгоритмів для автоматичної обробки даних та прийняття рішень щодо необхідності проведення ремонту або оптимізації роботи автомобіля.

Таким чином, подальші дослідження у цьому напрямку мають на меті удосконалення методів радіотехнічної діагностики для підвищення ефективності управління технічним станом автомобіля та його безпечної експлуатації.

Радіошум є важливим аспектом у контексті дослідження технічного стану двигунів. Оскільки різні джерела радіошуму можуть вказувати на конкретні технічні проблеми, то аналіз такого шуму дає змогу своєчасно виявляти несправності. Зокрема, частотні характеристики шуму можуть допомогти виявити аномалії в роботі двигуна, такі як неправильне згоряння пального в теплових двигунах або зношення компонентів у електричних і фрикційних парах. Інтегральна потужність радіошуму, що виникає від працюючих теплових двигунів, є результатом розподілу електричних зарядів у зоні згоряння пального. У випадку електричних двигунів, радіошум виникає через утворення струмів зміщення в електричних контактах, а у фрикційних парах тертя – через наявність контактної різниці потенціалів [5]. Такий підхід дозволяє не лише здійснювати поточний моніторинг роботи двигуна, але й передбачати можливі поломки, що є важливим для забезпечення надійності та безпеки експлуатації техніки.

Ось кілька авторів та література, які можуть бути корисними для дослідження проблем наукового напрямку «Радіотехнічна діагностика автомобіля»:

В.М. Литвинов, В.Ю. Степанов - Радіотехнічна діагностика технічного стану автомобіля: теорія та практика. У цій книзі розглядаються основи радіотехнічної діагностики, методи аналізу радіошуму та застосування радіотехнічних методів для оцінки стану різних систем автомобіля.

О.В. Чайка, А.В. Сидоренко - Радіофізичні методи та прилади для діагностики технічного стану транспортних засобів. Праця зосереджена на розробці методів радіофізичної діагностики, таких як вимірювання радіошуму, для контролю за роботою двигунів та інших важливих систем автомобілів.

І.В. Куликов - Методи і засоби радіотехнічної діагностики в автомобільній промисловості. Книга охоплює застосування радіотехнічних методів для моніторингу стану автомобілів, від двигунів до електронних систем, з акцентом на використання інноваційних радіодіагностичних інструментів.

А.Н. Бенашвілі - Аналіз та обробка радіошуму для діагностики технічних систем. У роботі розглядаються методи обробки радіошуму для виявлення несправностей в транспортних засобах, а також питання спектрального аналізу сигналів та їх застосування в діагностиці.

Ю.С. Рябков, М.С. Деркач - Основи радіотехнічної діагностики: теоретичні та практичні аспекти. Книга охоплює теоретичні засади та практичні аспекти застосування радіотехнічних методів для діагностики технічних систем, зокрема автомобільних.

М.А. Клімов - Автомобільні двигуни та їх радіотехнічна діагностика. У книзі обговорюються різні підходи до моніторингу та діагностики автомобільних двигунів за допомогою радіотехнічних методів, зокрема, за допомогою аналізу спектрів модуляцій радіошуму.

Ці джерела можуть служити науковою основою для подальших досліджень та розробок у сфері радіотехнічної діагностики автомобіля.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

У зв'язку з цим виникає завдання: розробити дистанційну та бортову апаратуру для аналізу та прийняття правильного рішення щодо продовження руху або оптимального управління транспортом шляхом аналізу радіошуму кожного окремого працюючого блоку (якщо це відноситься до двигуна), як в автоматизованому, так і в автоматичному режимі.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити метод та відповідну апаратуру для аналізу та вимірювання інтегральної потужності радіошуму різних транспортних засобів;
- розробити метод ідентифікації спектра амплітудних і фазово-частотних модуляцій, а також їх відхилення від еталонного шляхом аналізу зображення отриманого спектра модуляцій кожної з гармонік;
- провести аналіз отриманих результатів обробки радіошуму для різних видів транспорту.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Інтегральна потужність радіошуму є важливим показником технічного стану теплових двигунів. Радіошум виникає внаслідок електромагнітного випромінювання, що супроводжує процеси горіння палива у камері згорання. У камері згорання теплового двигуна відбувається розділення електричних зарядів. Після виходу продуктів згорання через вихлопний отвір відбувається нейтралізація цих зарядів, що спричиняє електромагнітне випромінювання в радіочастотному діапазоні. Радіохвилі поширюються у навколишньому середовищі та всередині транспортного засобу, де вони поводяться як хвилі у плазмовому хвилеводі.

Радіочастотний сигнал має комплексну структуру, тобто, модуляція частоти і модуляція амплітуди, а джерело модуляцій - нестационарне горіння палива. Процес горіння і, відповідно, характеристики радіошуму залежать від роботи форсунки, кількості палива, що впорскується та об'єму та складу повітря, що подається в камеру згорання; типу камери згорання (однокамерна або багатоканальна конструкція) і газодинаміки процесу згорання.

Аналіз інтегральної потужності і спектральних характеристик радіошуму дозволяє здійснювати оперативну діагностику стану двигуна без його розбирання, своєчасно виявляти несправності у роботі паливної апаратури та процесі згорання, оптимізувати процес горіння для підвищення паливної економічності та екологічності, підвищити надійність і довговічність експлуатації двигуна [6].

У працюючих теплових двигунах максимум інтенсивності радіочастотного випромінювання зазвичай зосереджений у діапазоні 90–150 кГц. Це випромінювання виникає внаслідок електромагнітних процесів у камері згорання під час розділення і нейтралізації електричних зарядів. Цей діапазон частот не використовується для радіомовлення, однак піддається впливу атмосферних радіошумів. Проте при розміщенні сенсорів радіошуму всередині транспортного засобу вплив атмосферних перешкод значною мірою блокується завдяки екрануванню металевим корпусом [7].

Для електричних систем, зокрема електродвигунів та акумуляторних батарей, характер випромінювання дещо інший. У електродвигунах основні джерела радіошуму пов'язані з струмами зміщення в контактах, колекторно-щіткових вузлах та індуктивних компонентах, що зумовлює появу випромінювання у ширшому діапазоні — від кількох кілогерц до сотень кілогерц, залежно від конструкції системи.

В електробатареях (особливо високовольтних) джерелом радіошуму є процеси заряджання/розряджання, що супроводжуються переміщенням іонів і пульсаціями напруги, що можуть створювати слабе випромінювання в діапазоні десятків до сотень кілогерц, але з меншою інтенсивністю у порівнянні з тепловими двигунами.

Для теплових двигунів радіовипромінювання має переважно стабільний максимум у вузькому діапазоні частот. Для електричних силових установок випромінювання ширше розподілене по спектру і більше залежить від режимів роботи інверторів, перетворювачів та імпульсних джерел живлення.

Металевий корпус транспортного засобу екранує радіочастотне випромінювання, тому вплив зовнішніх атмосферних перешкод усередині автомобіля або іншого транспорту значно знижується, що дозволяє точно реєструвати власні сигнали, пов'язані з роботою двигуна чи батареї. Зовнішні і внутрішні механічні впливи на корпус транспортного засобу реєструються у діапазоні 10–1000 Гц.

Джерелами модуляції радіошуму, окрім нестабільного горіння пального, радіовипромінювання модулюється роботою таких елементів: компресора, турбіни, різних механічних навантажень, що передаються на корпус транспортного засобу, фрикційними парами тертя. Процеси ерозійного горіння пального характеризуються частотами в межах 1500–3500 Гц.

Використання частотного розподілу для технічної діагностики дозволяє:

- здійснювати безперервний моніторинг технічного стану теплових двигунів;
- проводити окремі вимірювання інтегральної потужності випромінювання в двох ключових діапазонах (10–1000 Гц та 1500–3500 Гц). Обидва типи впливів діють незалежно, але їхня сукупна дія визначає працездатність двигуна і допоміжних систем. Оцінка готовності транспортного засобу до подальшого руху проводиться шляхом розрахунку добутку потужностей у двох діапазонах. Критерієм прийняття рішення є ступінь відхилення від середнього ефективного значення потужності, індивідуально встановленого для кожного транспортного засобу [8].

Дослідження спектральної потужності радіошуму проводиться під час руху транспортного засобу розпізнаванням спектральних образів амплітудної модуляції сигналу та порівнянням отриманого спектра з еталонним. Критеріями оцінки є відхилення за амплітудою або частотою окремих спектральних компонент і відхиленням за групами спектральних складових.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз спектральної потужності радіошуму дозволяє:

- обґрунтувати вимоги до розробки бортових автоматизованих систем ухвалення рішень щодо безпечного продовження руху;
- забезпечити дистанційну повну технічну діагностику двигунів транспортних засобів;
- підвищити надійність, безпеку та ефективність експлуатації автомобільного, морського і повітряного транспорту.

Останні дослідження в галузі радіотехнічної діагностики автомобілів та електромобілів спрямовані на розробку безконтактних, високоточних методів виявлення несправностей та моніторингу технічного стану транспортних засобів у режимі реального часу. Нижче наведено ключові напрями цих досліджень:

1. Радіочастотна і мікрохвильова діагностика дозволяє використання електромагнітного випромінювання (діапазон від десятків МГц до десятків ГГц) для аналізу фізичних змін у матеріалах та вузлах авто. Застосовується для контроль корозії елементів кузова, виявлення дефектів у високовольтних ланцюгах електромобілів, діагностики обмоток електродвигунів та інверторів.

2. Безконтактний радіолокаційний моніторинг сприяє розвитку FMCW-радарів (Frequency-Modulated Continuous Wave). Системи на базі 24 ГГц та 77 ГГц радарів дозволяють не лише аналізувати дорожню обстановку, а й виявляти вібрації вузлів під час роботи, визначати зміни у поведінці механізмів, які свідчать про знос або наближення до відмови.

3. Радіотехнічна діагностика акумуляторних систем електромобілів використовує ВЧ-сигнали для аналізу стану літій-іонних елементів для вимірювання імпедансу та резонансних характеристик, визначення внутрішньої деградації елементів без відкриття корпусу, створення портативних пристроїв для радіочастотної оцінки залишкової ємності.

4. Електромагнітна діагностика двигунів використовує моделі на основі ЕМ-сканування для виявлення міжвиткових замикань у статорі, аналізу магнітного поля для оцінки зносу підшипників або розбалансування.

5. Інтеграція з ШІ та IoT дозволяє застосування методів машинного навчання для аналізу радіотехнічних сигналів, класифікації типів несправностей за частотними характеристиками, підключення до хмарних платформ та дистанційний моніторинг стану електромобіля в реальному часі.

6. Перспективи розвитку полягають в мініатюризації сенсорів і інтеграції у штатні системи автомобілів та для використання терагерцових сканерів для глибокого контролю стану композитних матеріалів кузова при впровадженні методів радіотехнічної діагностики для автосервісів і техоглядів.

У статті приведені приклади, пов'язані з дослідженням поставленого завдання.

1. Розробка методу та апаратури для аналізу та вимірювання інтегральної потужності радіошуму транспортних засобів — це складна, але актуальна інженерна задача, що стосується електромагнітної сумісності (ЕМС), екологічної безпеки, кіберзахисту та радіомоніторингу. Для цього необхідно визначити інтегральну (сумарну) потужність радіошуму, що випромінюється транспортним засобом (ДВЗ, гібрид, електромобіль) у певному діапазоні частот, з урахуванням роботи двигуна та електрообладнання, зарядних систем (у разі електромобілів) та систем комутації (інвертори, ШІМ).

Методологія вимірювання полягає у визначенні діапазону частот для автомобільних систем з 150 кГц – 30 МГц (низькочастотний шум) та 30 МГц – 1 ГГц (високочастотний ЕМ-шум від цифрових та силових електронних систем). При виборі параметрів (таблиця 1.) інтегрування розраховують інтегральну потужність, що дорівнює інтегралу спектральної щільності потужності (PSD) по заданому діапазону:

$$P_{\text{інтегр}} = \int_{f_2}^{f_1} S(f) df$$

де $S(f)$ - спектральна щільність потужності шуму.

Для вимірювання використовують два режими:

- Стационарний вимір: у контрольному середовищі (екранована камера або полігон).
- Польовий вимір: за реальної експлуатації (дорога, майданчик).

Таблиця 1. Параметри вимірювального комплексу

Компонент	Опис
Антенa (широкопсмугова)	Логоперіодична, рамкова або феритова для діапазону 150 кГц – 1 ГГц.
ФНЧ/ВНЧ фільтри	Для виключення позасмугових сигналів.
Передпідсилювач	Підвищує чутливість системи.
Аналізатор спектру / SDR	Високочастотний аналіз сигналів з можливістю інтегрування PSD.
Обробник сигналу (модуль/ПЗ)	Обчислення інтегральної потужності, фільтрація, логування.
ПЗ управління	Візуалізація результатів, порівняння з нормами (CISPR, ГОСТ, ISO).

Мови/платформи: Python + SDR-пристрої (RTL-SDR, HackRF, USRP) або LabVIEW.

Функції поставлених завдань: аналіз, побудова спектрограм, автоматичне обчислення потужності, порівняння з нормативами. Далі проводиться оцінка результатів за допомогою побудови графіка інтегральної потужності по часу, карти розподілу по частоті/амплітуді. Використовується нормативна база: CISPR 12, 25 – радіоперешкоди від транспортних засобів; ГОСТ 30377, ГОСТ Р 51317 – методики випробування ЕМ-випромінювання; ISO 11452-1 – імунітет до радіочастотного випромінювання.

2. Розробка методу, що дозволяє автоматично виявляти ідентичність або відхилення в спектрі амплітудних та фазово-частотних модуляцій (АЧМ та ФЧМ) відносно еталонного зразка шляхом аналізу спектрального зображення кожної з гармонік сигналу полягає в необхідності створити метод і апаратно-програмний комплекс для виділення спектра модуляцій (АМ - варіації амплітуди гармонік, FM, PM - зміщення фази/частоти відносно несучої) кожної гармоніки сигналу, побудови його зображення/спектрограми, порівняння зі спектром еталонного сигналу та виявлення відхилень у модуляціях. Аналіз зображення модуляцій отриманих результатів обробки радіошуму для різних видів транспорту представлений на Рисунку 1.

На графіках можна побачити:

1. АМ-сигнал — синусоїда з амплітудною модуляцією.
2. Огинаюча сигналу, яка повторює форму низькочастотної модуляції.
3. Спектр огинаючої — містить основну модуляційну частоту (10 Гц) та гармоніки.

Цей приклад демонструє основний етап методу: перетворення сигналу у зображення спектру амплітудної модуляції.

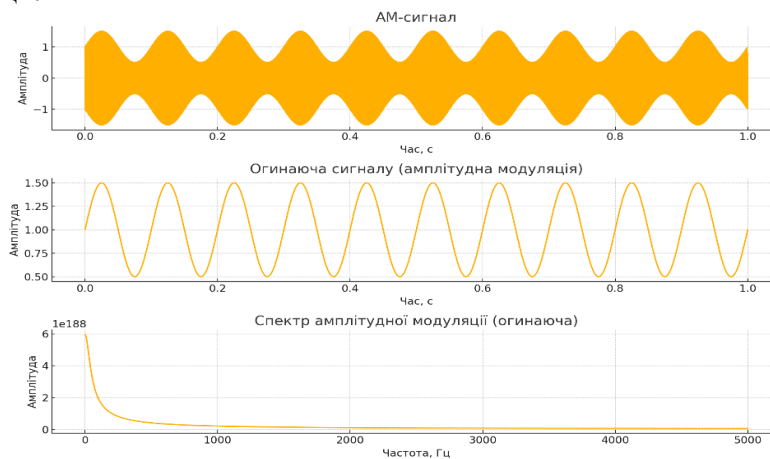


Рисунок 1. - Приклад Python-реалізації спектрального аналізу однієї гармоніки з побудовою її спектру амплітудної модуляції.

3 Для проведення аналізу результатів обробки радіошуму різних видів транспорту (ДВЗ, гібридів, електромобілів) потрібно оцінити, як змінюється інтегральна потужність, спектральний розподіл і тип модуляційних відхилень залежно від джерела шуму та принципу дії силового обладнання. Нижче подано структурований аналіз (таблиця 2).

Таблиця 2. Загальна характеристика транспортних засобів за рівнем радіошуму

Вид ТЗ	Основні джерела радіошуму	Очікуваний спектр	Особливості
ДВЗ (бензин/дизель)	Генератор, запалювання, форсунки, ЕБУ	До 30 МГц	Імпульсний, переривчастий шум, сильна АМ
Гібрид	Електродвигун, інвертор, ДВЗ, батарея	150 кГц – 100 МГц	Комбінований спектр з сильними АМ/ФМ
Електромобіль	Інвертори, ШІМ, батарея, зарядний блок	150 кГц – 300 МГц	Високочастотний шум, фазові модуляції, імпульсна структура

Для ДВЗ: - АМ-модуляція: домінує через генератор і запалювання.

- Відхилення: нестабільність амплітуди в низькочастотному діапазоні (100–500 кГц).

- Спектр: піки на 200 кГц, 800 кГц – типові для генераторів.

- Інтегральна потужність: до 0.5–1.2 мВт у межах 150 кГц–30 МГц.

Для гібридів: - Модуляції: комбіновані АМ/ФМ. Присутні гармоніки ШІМ керування.

- Відхилення: розширення спектра при перемиканні між режимами (електро/ДВЗ).

- Спектр: щільний в діапазоні 100 кГц–10 МГц, з "гребінцем" гармонік ШІМ.

- Інтегральна потужність: 2–5 мВт, залежно від режиму руху.

Для електромобіля: - ФМ/РМ-модуляції: характерні для інверторів і комутації.

- Відхилення: флуктуації частоти гармонік, «плаваючі» піки.

- Спектр: ширший, інтенсивніший у ВЧ-діапазоні (30–300 МГц).

- Інтегральна потужність: може перевищувати 10 мВт при зарядці або розгоні.

Нижче подано порівняльну візуалізацію (таблиця 3).

Таблиця 3. Порівняльна візуалізація (сценарій)

Параметр	ДВЗ	Гібрид	Електромобіль
Частотний діапазон шуму	100 кГц–30 МГц	100 кГц–100 МГц	150 кГц–300 МГц
Тип модуляції	АМ	АМ+ FM	FM+PM
Наявність гармонік	x	✓	✓ ✓
Максимальна інтегральна потужність (випромінена)	~1 мВт	~5 мВт	~10–15 мВт
Стійкість до відхилень	Висока	Середня	Низька (чутливий спектр)

Електромобілі мають найбільш широкий і інтенсивний радіошумовий спектр, пов'язаний з частотними модуляціями інверторів та високою швидкістю комутацій. Порівняльна спектрограма для трьох типів транспортних засобів представлена на Рисунку 2.

1. Гібриди демонструють змішані типи шуму, які можуть суттєво змінюватися залежно від режиму роботи (що ускладнює ідентифікацію).
2. ДВЗ є більш "передбачуваними" з точки зору шумів — у них домінує амплітудна модуляція, що чітко виділяється у спектрах.



Рисунок 2. - Порівняльна спектрограма для трьох типів транспортних засобів

На графіках представлено умовні спектри радіошуму для трьох типів транспортних засобів:

- ДВЗ: зосередження енергії в нижньому частотному діапазоні - типовий АМ-шум.
- Гібрид: складна структура спектру з гармоніками та флуктуаціями - наслідок перемикавання режимів.
- Електромобіль: високочастотна енергія з великою кількістю гармонік - характерно для ШІМ-комутації та інверторів.

ВИСНОВКИ

Радіотехнічна діагностика швидко трансформується зі сфери військових і аерокосмічних технологій у повсякденну експлуатацію автомобілів і електромобілів, відкриваючи нові горизонти для безконтактного, точного та швидкого моніторингу технічного стану. Ось приклади сучасних комерційних та експериментальних систем радіотехнічної діагностики, що застосовуються для автомобілів та електромобілів:

1. Bosch Radar-Based Diagnostics - автомобільні радары (24 та 77 ГГц). Спочатку створені для допомоги водієві (ADAS), але використовуються також для моніторингу вібрацій підвісок та для оцінки зміни профілю шин (через аналіз відбитих радіохвиль).
2. Vector eMobility Testing Solutions - діагностика високовольтних систем електромобіля (HV battery, e-motor, інвертор, RF-випромінювання для виявлення паразитних імпульсів і перешкод та підтримка аналізу EMC-випромінювання елементів силової електроніки).
3. Fluke ii910 Precision Acoustic Imager - візуалізація ультразвукових хвиль і радіовипромінювання. Застосовуються для виявлення витоків високої напруги та частот у енергосистемах електромобілів без зупинки роботи.
4. MIT CSAIL – RF-Pose - використання радіохвиль Wi-Fi діапазону для створення зображення рухомих механізмів крізь кузов, контроль динаміки елементів під час роботи двигуна або ходової частини, аналіз коливань і теплових деформацій.
5. Fraunhofer IMS – Smart Radar Sensor for Predictive Maintenance - інтеграція мікрорадарів у вузли автомобіля, можливе безконтактне виявлення механічного зносу, постійний контроль відхилень у роботі електромотора.
6. Oak Ridge National Laboratory (США) – RF Battery State Analyzer - аналіз стану акумулятора на основі мікрохвильового резонансу, дозволяє визначити стан літій-іонних комірок без розбирання батареї.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гречихін Л. І. (2016) Радіотехнічна діагностика транспортних систем / Л. І. Гречихін, Н. Г. Куць // Наукові нотатки. - 2016. - Вип. 55. - С. 87-89. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2016_55_18

2. Дембіцький В.М. (2018). Технічна експлуатація автомобілів [Текст]: Навчальний посібник / В.М. Дембіцький, В.І. Павлюк, В.М., Придюк – Луцьк: Луцький НТУ, 2018. – 473 с.
3. Веремей Г. О. (2017). Сучасні засоби технічної діагностики автомобілів. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів напряму підготовки 6.07010601 - «Автомобільний транспорт» спеціальності 8.07010601 - «Автомобілі та автомобільне господарство». – Чернівці: ЧНТУ, 2017. – 56 с.
4. Рязанцев О. В. (2023) Конспект лекцій з дисципліни «Радіотехнічні системи» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності - 172 «Електронні комунікації та радіотехніка». - Кам'янське; ДДТУ, 2023 р. – 90с.
5. Мигаль В. Д. (2018) Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: монографія / В. Д. Мигаль. Х.: Майдан, 2018. 262 с. ISBN 978-966-372-704-2.
6. В. М. Кичак (2018) Радіотехнічні системи (Основи проектування. Частина 1) : навчальний посібник / В. М. Кичак, А. Ю. Воловик, М. А. Шутило, О. П. Червак – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 122 с.
7. Мигаль В. Д., Лебедєв А.Т., Шуляк М.Л. (2019) Технічна діагностика автомобілів: конспект лекцій з дисципліни / - Харків : ХНТУСГ, 2019. - 129 с.
8. Паламар М.І., Стрембіцький М.О. (2023) Системи прецизійного управління мехатронних систем / Конспект лекцій за спеціальностями 175 «Інформаційно-вимірювальні технології», 176 – Мікро-та наносистемна техніка. – Тернопіль, 2023 – 94 с.

REFERENCES

1. Grechikhin LI (2016) Radiotechnical diagnostics of transport systems / LI Grechikhin, NG Kuts // Scientific Notes. - 2016. - Issue 55. - С. 87-89. - Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2016_55_18
2. Dembitsky V.M. (2018). Technical operation of cars [Text]: Study guide / V.M. Dembitskyi, V.I. Pavliuk, V.M. Prydiuk - Lutsk: Lutsk NTU, 2018. - 473 p.
3. Veremei H.O. (2017). Modern means of technical diagnostics of cars. Methodical instructions for performing laboratory work for students of the training direction 6.07010601 - "Road transport" specialty 8.07010601 - "Cars and automotive economy." - Chernihiv: ChNTU, 2017. - 56 p.
4. Ryazantsev O. V. (2023) Lecture notes on the discipline "Radio Engineering Systems" for applicants for higher education of the second (master's) level in the specialty - 172 "Electronic Communications and Radio Engineering". - Kamianske; DSTU, 2023 - 90 p.
5. Myhal VD (2018) Intelligent systems in the technical operation of cars: monograph / VD Myhal. Kh.: Maidan, 2018. 262 c. ISBN 978-966-372-704-2.
6. Kychak VM (2018) Radio engineering systems (Design basics. Part 1): a textbook / VM Kychak, AY Volovyk, MA Shutilo, OP Chervak - Vinnytsia: VNTU, 2018. - 122 p.
7. Migal VD, Lebedev AT, Shulyak ML (2019) Technical diagnostics of cars: lecture notes on the discipline / - Kharkiv: KHNTUA, 2019. - 129 c.
8. Palamar M.I., Strembitskyi M.O. (2023) Precision control systems of mechatronic systems / Lecture notes in the specialties 175 "Information and measurement technologies", 176 "Micro- and nanosystems technology." - Ternopil, 2023 - 94 p.

Kuts N.G., Bulik Y.V., Dubytskyi O.S., Mazylyuk P.V. Radio technical diagnostics of a car

This article provides a brief analysis of the scientific field of "Radio Technical Diagnostics of a Car". Automotive radio diagnostics is a method of technical control of automotive systems and components based on the use of radio waves (radio signals) to detect malfunctions, defects or changes in the physical properties of materials without disassembling or dismantling them. Operating thermal and electric motors are sources of intense electromagnetic radiation in the radio range. This radiation is modulated in frequency and amplitude by both internal processes of radio radiation generation and external influences. Using integral, spectral and correlation processing of a complex radio signal, it is possible to determine the main parameters of engine operation, the magnitude of internal friction and the nature of external influences on a moving vehicle. This makes it possible to assess the possibility of further use of the vehicle and to carry out its optimal management.

Thermal and electric motors, which are widely used in all types of transportation, are sources of intense electromagnetic radiation in the radio range. This radiation is modulated in frequency and amplitude. Modulation is caused by both internal processes of radio signal formation and external influences.

Integral, spectral, and correlation processing of the radio signal makes it possible to determine the main parameters of engine operation, the amount of internal friction, and the nature of external influences on

the vehicle while driving. This, in turn, makes it possible to assess the feasibility of further operation of the vehicle and ensure its efficient management.

Key words: transport, engine, radio radiation, technical diagnostics, radio signal,

КУЦЬ Надія Григорівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет e-mail: kuts.nadia86@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1934-7189>

БУЛІК Юрій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет e-mail: yurii.bulik@lutsk-ntu.com.ua <https://orcid.org/0000-0002-9787-434X>

ДУБИЦЬКИЙ Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет e-mail: oleksandr.dubyskyi@lutsk-ntu.com.ua <https://orcid.org/0000-0002-4863-4040>

МАЗИЛЮК Павло Вікторович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет e-mail: mazyliuk@lutsk-ntu.com.ua <https://orcid.org/0000-0001-5071-5109>

Nadiia KYTS, PhD in Engineering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: kuts.nadia86@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1934-7189>

Yuriy BULIK, PhD in Engineering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: yurii.bulik@lutsk-ntu.com.ua <https://orcid.org/0000-0002-9787-434X>

Oleksandr DUBITSKY, PhD in Engineering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: oleksandr.dubyskyi@lutsk-ntu.com.ua <https://orcid.org/0000-0002-4863-4040>

Pavlo MAZILYUK, PhD in Engineering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: mazyliuk@lutsk-ntu.com.ua <https://orcid.org/0000-0001-5071-5109>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1731