

Висновки

Підвищення надійності систем електропостачання можливе за умови комплексної діагностики технічного стану обладнання та оптимізації режимів його роботи. Своєчасне виявлення дефектів, балансування навантажень і зниження втрат електроенергії сприяють покращенню якості електропостачання та зменшенню аварійності. Впровадження цифрових технологій і автоматизованого моніторингу забезпечує ефективне управління режимами мережі та підвищує експлуатаційну стійкість енергосистеми.

Література

1. Гутаревич Ю. Ф. та ін. Транспортні енергетичні установки (традиційні, нетрадиційні та альтернативні) : навч. посібник. Київ : НТУ, 2015. 244 с.
2. Нікітченко І. М. Обґрунтування основних параметрів пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03. Харків, 2016. 20 с.
3. Воронін Л. Г., Степанюк А. Р., Ружинська Л. І. Основні залежності та приклади розрахунків теплообмінних апаратів : навч. посіб. для студ. спец. «Обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів». Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 68 с.
4. Ковальчук О. О., Пилипенко В. П. Електропостачання промислових підприємств: теорія і практика. Харків : ХНУРЕ, 2018. 312 с.

УДК 621.43:004.932

МЕТОДИКА ДІАГНОСТИКИ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ ЗА АУДІОСИГНАЛОМ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Тхор Євген Анатолійович, аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка», e-mail: e.tkhor@zr.edu.ua, ORCID 0009-0003-9373-6753

Слинько Георгій Іванович, доктор технічних наук, професор кафедри АТДтаГЕУ, Національний університет «Запорізька політехніка», e-mail: gslynko@zntu.edu.ua, ORCID 0000-0002-1954-8530

Сучасні методи діагностики двигунів внутрішнього згорання активно використовують цифрову обробку сигналів та алгоритми машинного навчання. Одним із перспективних напрямів є акустична діагностика, що базується на аналізі звукових сигналів, які виникають під час роботи двигуна. Звукові коливання містять значну кількість інформації про технічний стан двигуна, режим його роботи та навантаження. Розвиток методів штучного інтелекту та нейронних мереж дозволяє автоматизувати процес аналізу акустичних сигналів і здійснювати класифікацію режимів роботи двигуна з високою точністю. Використання таких підходів дозволяє створювати системи автоматичного

моніторингу технічного стану двигуна без необхідності встановлення складних датчиків [1-3].

Метою роботи є дослідження можливостей використання акустичної діагностики за допомогою нейронної мережі для виявлення станів і режимів роботи двигуна внутрішнього згорання. А також уточнення роботи самописної нейронної мережі в середовищі Python з використанням бібліотек TensorFlow та librosa [4]. В попередніх дослідженнях [4-5] було виявлено, що нейромережа доволі точно діагностує різні режими, а також відхилення в роботі двигуна в сталих умовах. В цій роботі були досліджені покращення в алгоритмах роботи програмного забезпечення, щоб програма могла відрізнити схожі по звучанню аудіосигнали. Це було досягнуто записом звуку роботи двигуна без навантаження і під навантаженням (автомобіль в русі).

В ході дослідження було зібрано дані роботи двигуна внутрішнього згорання автомобіля. Запис акустичних сигналів здійснювався за допомогою портативного цифрового рекордера Zoom H1. Мікрофон було зафіксовано у моторному відсіку автомобіля на сталій відстані від двигуна, що дозволило забезпечити однакові умови запису для всіх експериментів. Мікрофон було ізольовано від зайвих звуків, які могли заважати його роботі.

Об'єктом дослідження був бензиновий двигун Audi A4 1.8 TFSI (EA888), який перебував у справному технічному стані. Під час експерименту були записані акустичні сигнали для режимів роботи двигуни від $\bullet 800 \text{ хв}^{-1}$ до 3000 хв^{-1} . Кожен режим записувався у двох варіантах:

- без навантаження (двигун працює на місці);
- під навантаженням (рух автомобіля при тих самих обертах).

Таким чином було сформовано 8 класів акустичних сигналів. Навчання мережі здійснювалось шляхом подання спектрограм як вхідних ознак, відповідно до обертів двигуна. Після завершення тренування, була проведена класифікація аудіофайлів, які не входили до навчальної вибірки.

Аналіз спектральних характеристик акустичних сигналів показав наявність виражених резонансних складових, частотне положення яких змінюється залежно від частоти обертання двигуна. На спектральних зображеннях чітко спостерігаються горизонтальні смуги підвищеної енергії, що відповідають основній частоті механічних коливань та її кратним гармонійним складовим.

Порівняння спектральних характеристик сигналів при однакових обертах двигуна показало, що наявність навантаження практично не змінює основну частоту акустичних коливань, проте впливає на розподіл енергії між гармонійними складовими та загальний рівень шумової компоненти сигналу. Під навантаженням спостерігається збільшення інтенсивності широкосмугових складових спектра, що пов'язано зі зростанням механічних навантажень у вузлах двигуна.

Разом з тим результати класифікації показали, що зміна частоти обертання двигуна формує значно більш виражені акустичні відмінності, ніж зміна навантаження при тих самих обертах. У зв'язку з цим нейронна мережа більш впевнено розрізняє режими за частотою обертання колінчастого вала,

тоді як розділення режимів з навантаженням та без навантаження характеризується меншою ймовірністю класифікації.

Додатково було визначено середній рівень акустичного сигналу для кожного режиму роботи двигуна. Рівень сигналу визначався у dBFS (децибелах відносно повної шкали цифрового сигналу), де 0 dBFS відповідає максимально можливому рівню сигналу. Отримані значення змінюються в діапазоні від -40,59 dBFS для режиму роботи двигуна на 800 хв^{-1} без навантаження і до -12,08 dBFS для режиму роботи двигуна на 3000 хв^{-1} під навантаженням.

У результаті проведеного дослідження було розроблено методику акустичної діагностики режимів роботи двигуна внутрішнього згоряння із застосуванням нейромережевого аналізу аудіосигналів, а також створено відповідне програмне забезпечення для обробки та класифікації отриманих даних.

Отримані результати показали, що запропонована методика та реалізоване програмне забезпечення демонструють достатньо високу ефективність при ідентифікації режимів роботи двигуна. Нейромережа успішно виконує класифікацію акустичних сигналів не лише за частотою обертання колінчастого вала, але й за умовами роботи двигуна, зокрема розрізняючи режими з навантаженням та без навантаження навіть при однакових значеннях обертів. Особливу увагу слід звернути на те, що класифікація здійснювалася в умовах, коли акустичні сигнали різних режимів роботи мають близькі спектральні характеристики, що значно ускладнює їх розрізнення. Незважаючи на це, розроблена система змогла виявити характерні відмінності у звукових сигналах та забезпечити коректне визначення досліджуваних режимів роботи двигуна.

Висновки

Таким чином, результати дослідження підтверджують перспективність використання акустичних методів діагностики у поєднанні з алгоритмами штучного інтелекту для аналізу режимів роботи двигунів внутрішнього згоряння. Запропонована методика може бути використана як основа для створення автоматизованих систем контролю та попередньої діагностики технічного стану двигунів.

Література

1. **Li Zengfang, He Yong, Xu Gaohuan.** Engine Fault Diagnosis Model Based on Sound Intensity Analysis and Neural Network Integration. *Journal of Agricultural Machinery*. 2008. Vol. 39, no. 12. P. 170–173.
2. **Тхор Є. А., Сухонос Р. Ф., Слинько В. В.** Дослідження можливостей діагностики ДВЗ з використанням акустичних систем. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем* : тези доп. Всеукр. наук.-техн. інтернет-конф. (Рівне, 28–29 листоп. 2019 р.). Рівне : НУВГП, 2019. С. 145–146.
3. **Слинько Г. І., Сухонос Р. Ф., Тхор Є. А.** Особливості діагностики технічного стану ДВЗ з використанням акустичних систем. *Інформаційні технології: теорія і практика*: матеріали II Всеукр. інтернет-конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених (Запоріжжя, 4 квіт. 2019 р.). Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. С. 98–99.

4. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. MIT Press, 2016. 800 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10710-017-9314-z>.

5. Слинко Г. І. та ін. Діагностика режимів роботи двигуна внутрішнього згорання за аудіосигналом з використанням нейронної мережі. *Тиждень науки-2025* : зб. тез доп. щоріч. наук.-практ. конф. (Запоріжжя, 14–18 квіт. 2025 р.). Запоріжжя : НУ «ЗП», 2025. С. 32–34.

6. Slynko G. et al. Method for diagnosing engine technical condition by acoustic systems and neuronetworks. *AIP Conference Proceedings*. 2025. Vol. 3238, iss. 1. 060002. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0248896>.

УДК 629.33.004.5

ДІАГНОСТИКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Орищенко Сергій Вікторович, канд. техн. наук, доцент каф. ТіА,
Національний університет біоресурсів і природокористування України,
e-mail: oryschenko.sv@gmail.com, ORCID ID 0000-0002-5359-5285

У процесі експлуатації бензинового двигуна було зафіксовано погіршення динамічних характеристик, що проявлялося у зниженні тяги та підвищенні витрати палива. Проведена комп'ютерна діагностика за допомогою стандартних засобів OBD не виявила жодних кодів несправностей [1], а результати вимірювання компресії відповідали нормативним значенням. Відсутність електронно зафіксованих відхилень та задовільний стан основних параметрів циліндропоршневої групи ускладнювали локалізацію причини несправності [2].

З урахуванням симптомів та характеру роботи двигуна було прийнято рішення про проведення додаткової механічної перевірки газорозподільного механізму, зокрема контролю теплових зазорів клапанів. Для цього демонтовано клапанну кришку та виконано візуальну інспекцію елементів приводу. У ході огляду виявлено ознаки корозійного ураження поверхні розподільного вала (рис. 1), що проявлялися у вигляді локальних зон окиснення та порушення стану робочих поверхонь.

Встановлено, що причиною розвитку корозії стали особливості режиму експлуатації двигуна, а саме переважання короткотривалих поїздок. За таких умов двигун не досягає стабільного теплового режиму, що сприяє накопиченню конденсату та підвищенню вологості у внутрішньому об'ємі головки блока циліндрів. Тривалий вплив вологи та продуктів окиснення мастила призводить до деградації поверхонь деталей, зокрема розподільного вала.

Корозійні пошкодження розподільного вала можуть спричинити зміну профілю кулачків, погіршення умов тертя та нестабільність фаз газорозподілу, що безпосередньо впливає на наповнення циліндрів, ефективність згорання та