

УДК 627.51

<https://doi.org/10.31713/vt1202614>**Клімов С. В.**, [1; ORCID ID: 0000-0002-5993-847X],

К.Т.Н., доцент

Хітров І. О., [1; ORCID ID: 0000-0003-2310-1472],

PhD Student,

Рудик Б. П., [1; ORCID ID: 0000-0003-0112-9466],

к.ф.-м.н.

¹ Національний університет водного господарства та
природокористування, м. Рівне

ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДІАГНОСТИКИ КАТАЛІТИЧНИХ НЕЙТРАЛІЗАТОРІВ МЕТОДАМИ КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ ЛЯМБДА-ЗОНДІВ

У статті розглянуто актуальну науково-прикладну проблему підвищення ефективності діагностування трикомпонентних каталітичних нейтралізаторів (Three-Way Catalytic converters, TWC). Аналіз показує, що штатні алгоритми бортової діагностики (On-Board Diagnostics, OBD-II), які базуються на порогових значеннях амплітуд, фіксують несправність пізно – на етапі незворотної хімічної деградації активного шару. Це унеможливорює відстеження динаміки старіння вузла (State of Health) та призводить до експлуатації автомобіля з підвищеними викидами ще до появи індикації помилки.

Метою роботи є розробка та експериментальна верифікація методу оцінки залишкового ресурсу TWC на основі крос-кореляційного аналізу сигналів датчиків кисню. Дослідження виконано на базі масивів даних (Data Logs), отриманих з електронного блоку управління автомобіля VW з двигуном 1.4 MPi 16v BXW/CGGB, 63 кВт в реальних дорожніх умовах (міський цикл). Застосовано алгоритм двоступеневої фільтрації, що включає перевірку температурної стабілізації ($T > 80\text{ }^{\circ}\text{C}$) та валідацію сигналів у діапазоні 0 ... 1.2 В.

Встановлено, що для справного каталізатора коефіцієнт кореляції Пірсона становить $r \approx 0.35$, а максимум функції взаємної кореляції $R_{\max} \approx 0.41$. Отримані значення значно нижчі за критичний поріг 0.7, що підтверджує високу кисневу ємність (OSC) та ефективне згладжування коливань складу суміші.

Запропонований підхід дозволяє трансформувати діагностичні дані OBD у об'єктивний кількісний показник ("віртуальний сенсор"). Це створює підґрунтя для розробки мобільних застосунків, здатних виявляти деградацію нейтралізатора на ранніх стадіях, що сприяє економії ресурсів та збереженню дефіцитних металів платинової групи.

Ключові слова: лямбда-зонд, датчик кисню, бортова діагностика OBD-II, крос-кореляція, State of Health, каталітичний нейтралізатор.

Постановка проблеми. Сучасний науковий дискурс у сфері діагностики систем нейтралізації відпрацьованих газів змістив фокус з простої фіксації несправностей на предиктивну аналітику та моделювання процесів у реальному часі. Дослідження 2014–2025 років підкреслюють, що моніторинг ефективності каталізатора (Automotive Three-Way Catalysts - TWC) є критичним не лише для дотримання екологічних норм, а й для збереження ресурсу двигуна та паливної ефективності.

І на сьогодні, незважаючи на більше 50-ти річний досвід експлуатації TWC, пошук екологічно чистих варіантів все ще залишається критичною темою досліджень через дедалі суворіші норми викидів, а також ціну та дефіцит дорогоцінних металів, [1].

Еволюція конструкції трикомпонентних каталітичних нейтралізаторів (TWC) зумовлена необхідністю забезпечення стабільної ефективності в умовах постійних флуктуацій складу відпрацьованих газів між окислювальним та відновним середовищами. Ключовою характеристикою сучасних систем стала здатність до накопичення кисню (Oxygen Storage Capacity — OSC), яку традиційно забезпечує введення оксиду церію (Cerium Oxide, [2]). Цей компонент, завдяки оборотній зміні ступеня окиснення між Ce^{4+} та Ce^{3+} , діє як буфер, компенсуючи коливання паливо-повітряної суміші, а також стабілізує дисперсію благородних металів та носія ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$). Подальший розвиток технології, згідно з новітніми дослідженнями, спрямований на інтеграцію благородних металів (зокрема родію та паладію) безпосередньо у структуру перовскітоподібних оксидів (наприклад, легованих лантан-манганітів). Такі матеріали демонструють високу каталітичну активність щодо одночасної нейтралізації CO, NO та вуглеводнів (C_3H_6), [3] і стійкість до деактивації, оскільки кисень кристалічної ґратки ефективно компенсує динамічні зміни складу реагентів, [4].

Важливим фактором є також врахування впливу на екологію всього життєвого циклу TWC – від виготовлення до утилізації, т.я. він, за думкою [5] тільки «перетворює (converting)», а не зменшує вплив на навколишнє середовище. Тому важливим є найбільш ефективне визначення стану TWC.

Ключовим параметром діагностики залишається киснева ємність (Oxygen Storage Capacity — OSC), [6] однак методи її оцінки еволюціонували, [7]. Більш ранні роботи фокусувалися на прямій кореляції сигналів. Наприклад у роботі [8] визначено, що звичайна процедура діагностики деградації TWC проводиться шляхом оцінки відгуку сигналу датчика O₂, встановленого після каталізатора – аналіз коефіцієнта амплітуди та часу перемикання. Новітні дослідження пропонують використовувати методи машинного навчання [9] та фільтри Калмана для компенсації нелінійності сигналів вузькосмугових датчиків кисню, [6]. Особлива увага приділяється впливу перехідних процесів та температурних режимів на точність діагностики, [10] де хімічна кінетика реакцій відновлення NO_x та окислення CO стає визначальним фактором форми вихідного сигналу. Це підтверджує актуальність розробки алгоритмів, здатних розрізняти фізичне старіння активного шару від тимчасових змін у режимах роботи двигуна. Також відмічено, що рівень накопичення кисню вважається хорошим показником стану TWC, його складно безпосередньо виміряти [11].

Менше уваги в дослідженнях приділялося кисневим датчикам та їх поведінці, як тих, що встановлені вище, так і нижче TWC (які для нашого дослідження більш важливі), особливо під час перехідних процесів, [12]. Зокрема в [12] вивчались поведінка датчика від зміни співвідношення повітря/паливо перемикача вище та нижче за ТКН як у стаціонарних, так і в перехідних умовах роботи.

Актуальність теми. В умовах посилення екологічних стандартів (Euro 5/6) та зростання вимог до надійності транспортних засобів, критичного значення набуває моніторинг ефективності систем нейтралізації відпрацьованих газів. Традиційні алгоритми бортової діагностики (OBD-II) часто функціонують за принципом «чорної скриньки»: водій отримує сповіщення про несправність (індикатор Check Engine, коди P0420/P0430) вже постфактум, коли каталітичний нейтралізатор (TWC) вже зазнав незворотної деградації або повної втрати хімічної активності. Така «реактивна» модель не дозволяє

відслідковувати динаміку старіння вузла (State of Health — SoH) та прогнозувати його залишковий ресурс.

Розвиток сучасних інформаційних технологій дозволяє вирішити цю проблему шляхом впровадження концепції «віртуальних сенсорів». На відміну від встановлення додаткового дороговартісного лабораторного обладнання, цей підхід базується на алгоритмічній обробці вже наявних потоків даних ECU (обертів двигуна — RPM, навантаження — Engine Load, напруги датчиків кисню — O2 Voltage). Застосування методів математичного аналізу, таких як крос-кореляція сигналів та аналіз перехідних процесів, дозволяє синтезувати нові діагностичні параметри, перетворюючи "сирі" дані логування на точні показники ефективності накопичення кисню каталізатором.

Економічна доцільність удосконалення методів діагностики обумовлена високою вартістю компонентів TWC, що містять метали платинової групи (платина, паладій, родій - Platinum group metals, PGMs), [13], [14]. Точна оцінка поточного стану нейтралізатора дозволяє, з одного боку, уникнути передчасної заміни дорогого вузла через хибні спрацювання стандартних алгоритмів, а з іншого — попередити критичні пошкодження двигуна, викликані оплавленням сот та підвищенням протитиску у випускній системі.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка програмних інструментів для глибокого аналізу даних OBD-логів, що є актуальним науково-технічним завданням, що поєднує питання екології, економіки експлуатації та прикладної обробки даних.

Об'єкт дослідження: процес діагностування технічного стану систем нейтралізації відпрацьованих газів двигунів внутрішнього згоряння в умовах динамічних режимів експлуатації.

Предмет дослідження – методи та інформаційні технології оцінки ефективності трикомпонентного каталітичного нейтралізатора (TWC) на основі крос-кореляційного аналізу сигналів кисневих датчиків та параметрів роботи двигуна (RPM, Engine Load).

Методи дослідження.

1. Збір та структура експериментальних даних

Емпіричну основу дослідження складають масиви даних (Data Logs), отримані з електронного блоку управління (ECU) автомобіля VW з двигуном 1.4 MPi 16v (код двигуна BXW/CGGB, потужність 63 кВт) під час експлуатації в реальних дорожніх умовах (міський режим). Зчитування параметрів здійснювалося через діагностичний

інтерфейс OBD-II (On-Board Diagnostics) Vgate iCar Pro ELM327 та Viescar ELM327 V1.5 на PIC18F25K80.

Вхідний набір даних представлено у форматі CSV, де кожній часовій мітці t відповідає вектор станів системи $V_t = \{S_1(t), S_2(t), L(t), n(t), T(t)\}$, де:

- $S_1(t)$ – напруга керуючого датчика кисню (O2 Bank 1 Sensor 1), В;
- $S_2(t)$ – напруга діагностичного датчика кисню (O2 Bank 1 Sensor 2), В;
- $L(t)$ – розрахункове навантаження на двигун (Engine Load), %;
- $n(t)$ – частота обертання колінчастого вале (RPM), хв^{-1} ;
- $T(t)$ — температура охолоджуючої рідини (Engine Coolant Temperature), $^{\circ}\text{C}$.

2. Попередня обробка та фільтрація даних (Data Preprocessing)

Для виключення хибних результатів, викликаних перехідними процесами прогріву двигуна або режимом відсічки палива (Fuel Cut-off), застосовано алгоритм умовної фільтрації. До аналізу допускаються лише вибірки, що задовольняють умовам:

1. **Температурна стабілізація:** $T(t) > 80^{\circ}\text{C}$ (забезпечення робочої температури каталізатора light-off temperature).
2. **Активний режим роботи:** $n(t) > 600$ (виключення режимів зупинки двигуна).
3. **Валідність сигналів:** Для виключення артефактів вимірювання та фільтрація електричних завад застосовано двоступеневу валідацію даних. По-перше, встановлено коридор допустимих значень напруги $0 < S_{1,2}(t) < 1.2$ В. Верхня межа 1.2 В обрана з урахуванням можливих короткочасних викидів напруги при глибокому збагаченні суміші, водночас вона дозволяє відсіяти аномальні значення (замикання на ланцюги живлення). По-друге, враховано специфіку роботи датчиків у номінальному режимі: Керуючий датчик (S_1) генерує сигнал з амплітудою 0.1 ... 0.9 В та високою частотою перемикачів. Діагностичний датчик (S_2) у справному стані демонструє демпфований сигнал у вузькому діапазоні (зазвичай 0.6 ... 0.8 В) зі зниженою амплітудою, [15].

3. Математична модель крос-кореляційного аналізу

Основним методом оцінки технічного стану (State of Health — SoH) каталітичного нейтралізатора обрано аналіз взаємної кореляції (Cross-Correlation Analysis) вхідного та вихідного сигналів.

Фізична сутність методу полягає у перевірці гіпотези: справний каталізатор з високою кисневою ємністю (OSC) інтегрує високочастотні коливання вхідного сигналу S_1 , роблячи вихідний сигнал S_2 асинхронним та згладженим. Деградований каталізатор втрачає інтегруючу здатність, призводячи до синхронізації сигналів.

Для кількісної оцінки розраховується коефіцієнт кореляції Пірсона r для дискретних рядів даних довжиною N :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (S_1[i] - \bar{S}_1)(S_2[i] - \bar{S}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_1[i] - \bar{S}_1)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (S_2[i] - \bar{S}_2)^2}}, \quad (1)$$

де $\bar{S}_1$, $\bar{S}_2$ – середні значення напруги за період вибірки.

Враховуючи транспортну затримку газів (time delay) між датчиками, застосовується функція крос-кореляції $R(\tau)$ з пошуком максимуму на відрізьку можливих затримок τ :

$$R_{\max} = \max_{\tau} \left(\frac{E[(S_1(t) - \bar{S}_1)(S_2(t + \tau) - \bar{S}_2)]}{\sigma_{S1}\sigma_{S2}} \right), \quad (2)$$

4. Критерії прийняття рішень

На основі обчисленого коефіцієнта $R_{\max}$ система приймає рішення про стан каталізатора за наступною логікою:

- $R_{\max} < 0.5$: Висока ефективність. Каталізатор працює як фільтр низьких частот, хімічні реакції протікають активно.
- $0.5 \leq R_{\max} < 0.7$: Зона ризику (Pre-failure). Початок деградації активного шару, зниження ємності OSC.
- $R_{\max} \geq 0.7$: Критична несправність. Каталізатор втратив здатність накопичувати кисень, сигнали ідентичні за формою (відповідає коду помилки P0420).

Результати досліджень і обговорення.

1. Аналіз часових рядів та динаміки сигналів

Для проведення експериментального дослідження було відібрано часовий сегмент роботи двигуна після досягнення робочої температури охолоджуючої рідини $T > 80^{\circ}\text{C}$. Це забезпечило умови, за яких каталітичний нейтралізатор досяг температури активації ("light-off temperature"), а система керування двигуном перейшла в режим замкненого контуру (Closed Loop).

На рис. 1 представлено графік часових рядів напруги датчиків кисню:

- **Сигнал S_1 (Bank 1 Sensor 1):** Демонструє характерну високочастотну осциляцію в діапазоні 0.1...0.9 В. Це свідчить про активну роботу електронного блоку управління (ECU) з корекції паливо-повітряної суміші навколо стехіометричного співвідношення ($\lambda = 1$).

- **Сигнал S_2 (Bank 1 Sensor 2):** Характеризується високою стабільністю. Амплітуда коливань є мінімальною, а рівень напруги утримується в діапазоні 0.6...0.75 В. Така поведінка підтверджує, що хімічні процеси відновлення кисню в каталізаторі протікають ефективно, згладжуючи вхідні коливання.

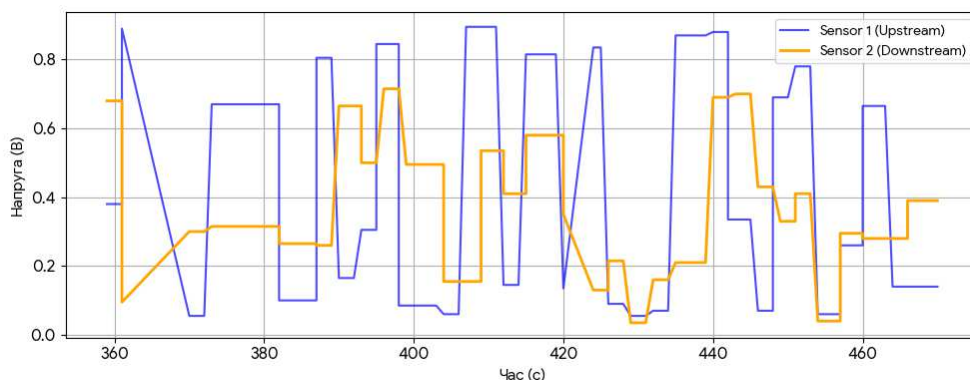


Рис. 1. Часові ряди сигналів датчиків кисню (Time Series) для сегменту активної роботи

2. Кореляційний аналіз та оцінка стану (SoH)

Застосування розробленого алгоритму крос-кореляційного аналізу до масиву експериментальних даних дозволило отримати кількісні показники ефективності TWC.

Діаграма розсіювання (Scatter Plot), наведена на рис. 2, візуалізує залежність $S_2 = f(S_1)$. Відсутність чітко вираженої діагональної структури та розташування точок у вигляді горизонтальної "хмари" вказує на слабкий лінійний зв'язок між входом та виходом системи.

Розрахунок коефіцієнта кореляції Пірсона для досліджуваної вибірки дав результат: $r \approx 0.35$.

Згідно з методикою, це значення знаходиться в зоні **"Висока ефективність"** ($r < 0.5$). Це математично доводить, що вихідний сигнал є незалежним від вхідних збурень, що є головною ознакою справного каталізатора з достатньою ємністю кисню (OSC).

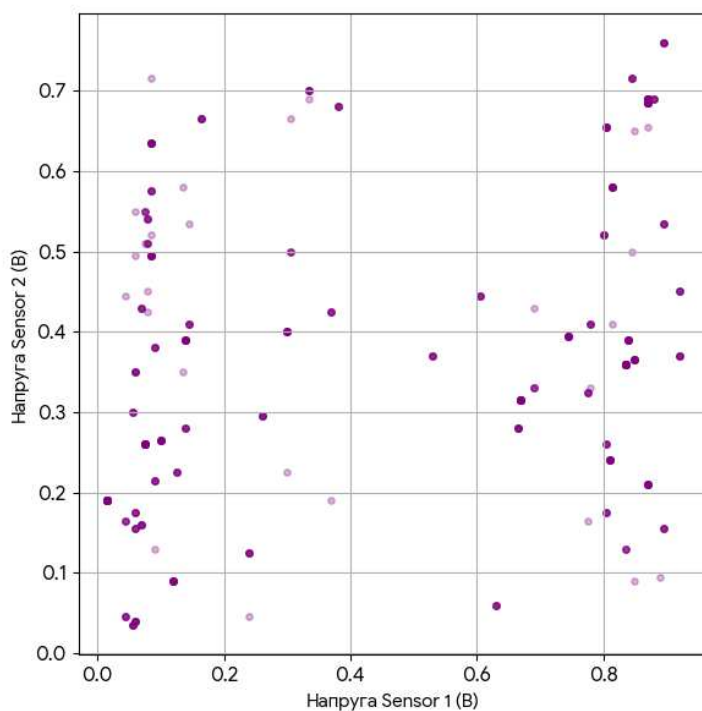


Рис. 2. Діаграма розсіювання (Scatter Plot). Коефіцієнта кореляції Пірсона $r \approx 0.35$

3. Аналіз функції крос-кореляції

Для врахування транспортної затримки газів було побудовано функцію крос-кореляції (рис. 3). Максимальне значення функції

склало: $R_{\max} \approx 0.41$. Низька амплітуда піку кореляційної функції $R_{\max}$ (значно менше порогового значення 0.7, що характерний для деградованих нейтралізаторів і відповідає коду помилки P0420) підтверджує відсутність ефекту "наскрізного проходження" газів, а, відповідно й гарні фільтруючі властивості TWC: високочастотні коливання складу суміші поглинаються завдяки окисно-відновним реакціям у шарі церію, що унеможлиблює синхронізацію сигналів датчиків. Навіть при зсуві сигналу у часі, форма вихідного сигналу не повторює форму вхідного.

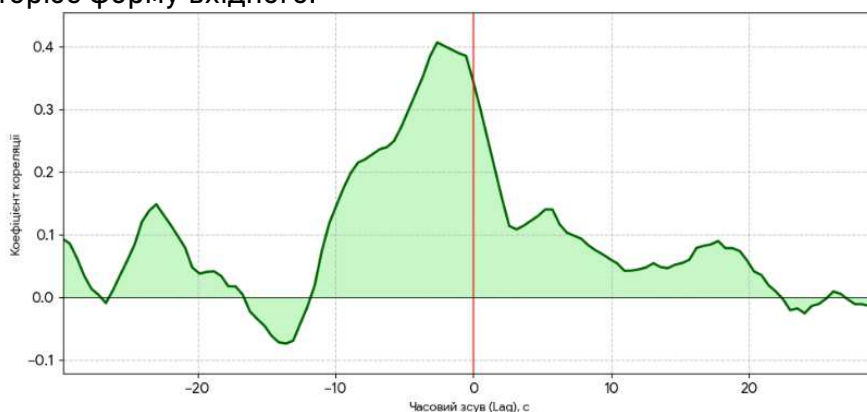


Рис. 3. Функція взаємної кореляції (*Cross-Correlation Function*)

4. Обговорення результатів

Отримані результати $R_{\max} = 0.41$ свідчать про те, що досліджуваний каталітичний нейтралізатор знаходиться у задовільному технічному стані. Запропонований метод дозволив отримати точну метрику стану (State of Health) без використання зовнішнього газоаналізатора.

Важливо зазначити, що традиційна система OBD-II генерує помилку лише при досягненні критичного порогу деградації. Натомість, розрахований індекс 0.41 є динамічним параметром. Його моніторинг у часі дозволить виявити тренд до погіршення (наприклад, зростання до 0.55...0.60) задовго до повної відмови вузла, що реалізує концепцію предиктивної діагностики.

Висновки. У роботі проведено комплексне дослідження ефективності діагностики трикомпонентних каталітичних

нейтралізаторів (TWC) на основі аналізу даних бортової системи OBD-II. Запропоновано та експериментально верифіковано методику оцінки технічного стану (State of Health) вузла, яка базується на математичному апараті крос-кореляційного аналізу сигналів датчиків кисню.

Основні результати дослідження:

1. Коефіцієнт взаємної кореляції між сигналами керуючого (Sensor 1) та діагностичного (Sensor 2) λ -зондів є об'єктивним індикатором кисневої ємності каталізатора. Для справного каталізатора, що працює в режимі хімічної рівноваги, цей показник не перевищує порогового значення 0.5.

2. Запропонований підхід дозволяє виявляти деградацію каталітичного шару на ранніх стадіях (при зростанні кореляції до 0.6–0.7), ще до появи помилок P0420/P0430 на панелі приладів. Це забезпечує можливість своєчасного технічного обслуговування та запобігання забрудненню навколишнього середовища.

3. Впровадження точних методів діагностики сприяє подовженню терміну експлуатації компонентів, що містять дороговартісні метали платинової групи, та зменшенню експлуатаційних витрат.

Перспективи подальших досліджень. Отримані алгоритми та залежності створюють наукове підґрунтя для розробки прикладного програмного забезпечення. Наступним етапом роботи є створення мобільного додатку, який дозволить автоматизувати процес збору даних через ELM327-адаптери та розраховувати "Індекс здоров'я каталізатора" в режимі реального часу, роблячи професійну діагностику доступною для широкого кола користувачів.

1. S. Keav, S. Matam, D. Ferri, i A. Weidenkaff, «Strukturovani katalizatory na osnovi perovskitu ta yikh zastosuvannya yak trykomponentnykh katalitychnykh neytralizatoriv — Ohlyad», Katalizatory, vyp. 4, s. 226–255, Lyp 2014, doi: 10.3390/catal4030226. 2. «Oksyd tseriyu - ohlyad | Temy ScienceDirect». Data zvernennya: 11 hrudnya 2025 r. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/cerium-oxide> 3. «Yemnist' zberihannya kysnyu v oksydakh, pov'yazanykh z perovskitom: rol' nadstekhiometrychnoho kysnyu v trystoronn'omu katalizi», v Doslidzhennya v haluzi nauky pro poverkhnyu ta katalizu, vyp. 116, Elsevier, 1998, s. 581–589. doi: 10.1016/S0167-2991(98)80913-0. 4. «Zberihannya kysnyu - ohlyad | Temy ScienceDirect». Data zvernennya: 11 hrudnya 2025 r. [Onlayn]. Dostupnyy u:

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/oxygen-storage> 5. W. Amatayakul i O. Ramnäs, «Otsinka zhyttyevoho tsyklu katalitychnoho neytralizatora dlya lehkovykh avtomobiliv», J. Clean. Vyrobynyk - J CLEAN PROD, vyp. 9, s. 395–403, Zhov 2001, doi: 10.1016/S0959-6526(00)00082-2. 6. P. Kiwitz, C. Onder, i L. Guzzella, «Kontrol'-oriyentovane modelyuvannya trykomponentnoho katalitychnoho neytralizatora z sposterezhennyam profilyu vidnosnoho rivnya kysnyu», J. Process Control, vyp. 22, s. 984–994, lyp. 2012, doi: 10.1016/j.jprocont.2012.04.014. 7. L. Mc Grane ta in., «Oxygen Storage Capacity (OSC) Measurement of 3-Way Automotive Catalysts Using the CATAGEN OMEGA Test Reactor», SAE International, ver. 2021, doi: 10.4271/2021-24-0083. 8. Y. Syu, J. Wu, J. Syu, B.-C. Chen ta Y.-Y. Wu, Development of Three-Way Catalytic Converter Diagnostic Strategy, 2015, doi: 10.4271/2015-32-0783. 9. S. Onwusa, A. Mathins, G. I. Okolotu, E. Uchekchukwu ta O. Cyril, «Assessment of Real-Time Monitoring of Catalytic Converters Performance Using Advanced Sensor Technology in Motor Vehicles», vyp. 8, s. 129–151, lyp. 2025, doi: 10.5281/zenodo.16317764. 10. E. Brandt, Y. Wang ta J. Grizzle, «Dynamic modeling of a three-way catalyst for SI engine exhaust emission control», IEEE Trans. Control Syst. Technol., vyp. 8, s. 767–776, zhovt. 2000, doi: 10.1109/87.865850. 11. C. Guardiola, H. Climent, B. Pla ta M. Real, «Control-oriented modelling of three-way catalytic converter for fuel-to-air ratio regulation in spark ignited engines», Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Automob. Eng., vyp. 233, № 14, s. 3758–3774, hrud. 2019, doi: 10.1177/0954407019833822. 12. T. Auckenthaler, C. Onder ta H. Geering, Control-Oriented Investigation of Switch-Type Air/Fuel Ratio Sensors. 2002. 13. Chidunchi, M. Kulikov, R. Safarov ta E. Kopishev, «Extraction of platinum group metals from catalytic converters», Heliyon, vyp. 10, s. e25283, lyut. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25283. 14. M. Grilli, A. Slobozeanu, C. Larosa, D. Paneva, I. Yakoumis ta Z. Zheleva, «Platinum Group Metals: Green Recovery from Spent Auto-Catalysts and Reuse in New Catalysts—A Review», Crystals, vyp. 13, s. 550, ber. 2023, doi: 10.3390/cryst13040550. 15. Snap-on Incorporated, «Volkswagen/Audi Vehicle Communication Software Manual». [Onlayn]. Dostupno za adresoyu: <https://manuals.plus/m/b13c8dae43e7af6dde55548abc5cccd98c9cddc0f15a6e5d06687b20407b9533.pdf> [cite_start]N1 — 171 storinka [cite: 16, 62]

REFERENCES:

1. S. Keav, S. Matam, D. Ferri, i A. Weidenkaff, «Structured Perovskite-Based Catalysts and Their Application as Three-Way Catalytic Converters—A Review», *Catalysts*, вип. 4, с. 226–255, Лип 2014, doi: 10.3390/catal4030226.
2. «Cerium Oxide - an overview | ScienceDirect Topics». Дата звернення: 11, Грудень 2025. [Online]. Доступний у:

<https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/cerium-oxide> 3. «Oxygen storage capacity in Perovskite-related oxides: The role of over-stoichiometric oxygen in three-way catalysis», в *Studies in Surface Science and Catalysis*, вип. 116, Elsevier, 1998, с. 581–589. doi: 10.1016/S0167-2991(98)80913-0. 4. «Oxygen Storage - an overview | ScienceDirect Topics». Дата звернення: 11, Грудень 2025. [Online]. Доступний у: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/oxygen-storage> 5. W. Amatayakul і O. Ramnäs, «Life cycle assessment of a catalytic converter for passenger cars», *J. Clean. Prod. - J CLEAN PROD*, вип. 9, с. 395–403, Жов 2001, doi: 10.1016/S0959-6526(00)00082-2. 6. P. Kiwitz, C. Onder, і L. Guzzella, «Control-oriented modeling of a three-way catalytic converter with observation of the relative oxygen level profile», *J. Process Control*, вип. 22, с. 984–994, Лип 2012, doi: 10.1016/j.jprocont.2012.04.014. 7. L. Mc Grane et al., «Oxygen Storage Capacity (OSC) Measurement of 3-Way Automotive Catalysts Using the CATAGEN OMEGA Test Reactor», SAE International, Бер 2021. doi: 10.4271/2021-24-0083. 8. Y. Syu, J. Wu, J. Syu, B.-C. Chen, і Y.-Y. Wu, *Development of Three-Way Catalytic Converter Diagnostic Strategy*. 2015. doi: 10.4271/2015-32-0783. 9. S. Onwusa, A. Mathins, G. I. Okolotu, E. Uchechukwu, і O. Cyril, «Assessment of Real-Time Monitoring of Catalytic Converters Performance Using Advanced Sensor Technology in Motor Vehicles», вип. 8, с. 129–151, Лип 2025, doi: 10.5281/zenodo.16317764. 10. E. Brandt, Y. Wang, і J. Grizzle, «Dynamic modeling of a three-way catalyst for SI engine exhaust emission control», *Control Syst. Technol. IEEE Trans. On*, вип. 8, с. 767–776, Жов 2000, doi: 10.1109/87.865850. 11. C. Guardiola, H. Climent, B. Pla, і M. Real, «Control-oriented modelling of three-way catalytic converter for fuel-to-air ratio regulation in spark ignited engines», *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Automob. Eng.*, вип. 233, вип. 14, с. 3758–3774, Груд 2019, doi: 10.1177/0954407019833822. 12. T. Auckenthaler, C. Onder, і H. Geering, *Control-Oriented Investigation of Switch-Type Air/Fuel Ratio Sensors*. 2002. 13. Chidunchi, M. Kulikov, P. Сафаров, і E. Kopishev, «Extraction of platinum group metals from catalytic converters», *Heliyon*, вип. 10, с. e25283, Лют 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25283. 14. M. Grilli, A. Slobozeanu, C. Larosa, D. Paneva, I. Yakoumis, і Z. Zheleva, «Platinum Group Metals: Green Recovery from Spent Auto-Catalysts and Reuse in New Catalysts—A Review», *Crystals*, вип. 13, с. 550, Бер 2023, doi: 10.3390/cryst13040550. 15. Snap-on Incorporated, «Volkswagen/Audi Vehicle Communication Software Manual». [Online]. Доступний у: <https://manuals.plus/m/b13c8dae43e7af6dde55548abc5cccd98c9cddc0f15a6e5d06687b20407b9533.pdf> [cite_start]N1 - 171 pages [cite: 16, 62]

Klimov S. V., [1; ORCID ID: 0000-0002-5993-847X],

PhD, Associate Professor

Khitrov I. O., [1; ORCID ID: 0000-0003-2310-1472],

PhD, Associate Professor,

Rudyk B. P., [1; ORCID ID: 0000-0003-0112-9466],

PhD, Associate Professor

¹ National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

INFORMATION SUPPORT FOR CATALYTIC CONVERTER DIAGNOSTICS BASED ON CORRELATION ANALYSIS OF LAMBDA PROBE SIGNALS

The article addresses the urgent scientific and applied problem of improving the diagnostic efficiency of Three-Way Catalytic converters (TWC). Analysis shows that standard On-Board Diagnostics (OBD-II) algorithms, which rely on amplitude threshold values, detect malfunctions too late — only at the stage of irreversible chemical degradation of the active layer. This makes it impossible to monitor the assembly's aging dynamics (State of Health) and leads to vehicle operation with increased emissions before any error indication appears.

The aim of the work is the development and experimental verification of a method for assessing the TWC residual life based on cross-correlation analysis of oxygen sensor signals. The study was conducted using Data Logs obtained from the Electronic Control Unit of a VW 1.4 MPi 16v BXW/CGGB, 63 kW vehicle under real-world driving conditions. A two-stage filtering algorithm was applied, including temperature stabilization verification ($T > 80\text{ }^{\circ}\text{C}$) and signal validation within the 0 ... 1.2 V range.

It was established that for a functional catalyst, the Pearson correlation coefficient is $r \approx 0.35$, and the maximum cross-correlation value is $R_{\max} \approx 0.41$. These values are significantly below the critical threshold of 0.7, confirming high Oxygen Storage Capacity (OSC) and effective smoothing of air-fuel mixture fluctuations.

The proposed approach allows transforming diagnostic data into an objective quantitative metric ("virtual sensor"). This creates a foundation for developing mobile applications capable of detecting converter degradation at early stages, contributing to cost savings and the preservation of scarce Platinum Group Metals.

Keywords: oxygen sensor, lambda probe, OBD-II, cross-correlation,

diagnostics, State of Health, Platinum Group Metals, Three-Way Catalytic converter (TWC).

Отримано: 12 січня 2026 року
Прорецензовано: 25 лютого 2026 року
Прийнято до друку: 27 березня 2026 року



© 2026 [Klimov S. V., Khitrov I. O., Rudyk B. P.]. Licensee [NUWEE]. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC) license (creativecommons.org).