

Стадник О. С., (1:ORCID: 0000-0002-9066-3806)

К.Т.Н., доцент

Морозюк С. В., (1:ORCID: 0000-0002-8904-9614)

старший викладач

Ігнатюк Р. М., (1:ORCID: 0000-0002-1004-1469)

К.Т.Н., доцент

Рижий О. П., (1:ORCID: 0000-0002-8592-1217)

К.Т.Н., доцент

Серілко Л. С., (1:ORCID: 0000-0002-2396-561X)

К.Т.Н., доцент

¹ Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне

ДІАГНОСТУВАННЯ СТАРТЕРНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У роботі досліджено можливості використання штучного інтелекту для діагностування стартерних свинцево-кислотних акумуляторних батарей транспортних засобів. Запропоновано інтегральний критерій оцінювання залишкового ресурсу, який враховує стан здоров'я (SoH), стан заряду (SoC), внутрішній опір, напругу холостого ходу (OCV) та струм холодного запуску (CCA). Вагові коефіцієнти показників визначено за допомогою платформ штучного інтелекту ChatGPT, Gemini та DeepSeek, використаних як експертні системи.

Експериментальні дослідження проведено на акумуляторних батареях різного технічного стану із застосуванням тестера Foxsur FBT-300. Встановлено, що найбільший вплив на інтегральний показник мають стан здоров'я батареї та внутрішній опір. Отримано високий рівень кореляції між інтегральним критерієм і показником SoH, що підтверджує достовірність запропонованого підходу.

За значенням інтегрального критерію батареї поділено на три групи: придатні до надійної експлуатації (0,60–1,00), придатні з обмеженнями (0,30–0,60) та непридатні для використання як стартерні (менше 0,30). Граничне значення показника залишкового ресурсу становить 0,287. Запропонована методика забезпечує комплексне оцінювання технічного стану акумуляторних батарей і може бути використана для автоматизації процесів діагностування на підприємствах автомобільного транспорту та станціях технічного обслуговування.

Ключові слова: свинцево-кислотна акумуляторна батарея, залишковий ресурс, штучний інтелект, інтегральний критерій, стан здоров'я (SoH), пусковий струм

Штучний інтелект дедалі частіше використовується для виявлення, класифікації та прогнозування несправностей у двигунах, електроприводах, датчиках та мережах сучасних транспортних засобів. Це дозволяє переходити від поточного ремонту до прогнозного обслуговування й підвищувати безпеку.

Сучасні платформи штучного інтелекту не є чимось сталим, вони постійно адаптується відповідно до нової науково-технічної, практичної та рекламної інформації, що опублікована в мережі. Сьогодні нейромережі мають високу продуктивність зі збору та аналізу науково-технічної інформації, що може допомогти у процесі технічного обслуговування та ремонту транспортних засобів. Використання штучного інтелекту у якості експерта-діагноста автомобілів на нашу думку є перспективним напрямом досліджень.

Свинцево-кислотні акумуляторні батареї широко використовують у транспортних засобах із двигунами внутрішнього згорання. Завдяки низькому внутрішньому опору вони здатні швидко віддавати значну кількість електричної енергії, що забезпечує надійний запуск двигуна внутрішнього згорання стартером. У разі виходу батареї з ладу запуск двигуна стає неможливим. Тому забезпечення надійної роботи та своєчасної діагностики акумуляторної батареї має першочергове значення.

У процесі діагностування деталей та вузлів використовують різні види інформації, отримані у результаті візуального огляду, вимірювання геометричних та фізичних показників та порівняння цих даних з допустимими значеннями. При діагностуванні чи моніторингу експлуатації свинцево-кислотних акумуляторних батарей отримують, переважно, інформацію про електричні параметри, які по різному впливають на залишковий ресурс цих елементів транспортного засобу. У роботі запропоновано оцінити залишковий ресурс (RUL) свинцево-кислотних акумуляторних батарей за допомогою інтегрального показника, що включає інформацію про різні виміряні діагностичні показники з певним коефіцієнтом впливу, де у якості експерта використано штучний інтелект.

На сьогодні існує широкий спектр діагностичних приладів для оцінювання технічного стану свинцево-кислотних акумуляторних батарей, які дають змогу протягом кількох хвилин визначити такі параметри, як стан заряду (SoC), стан здоров'я або відношення кількості електричної енергії, що накопичує акумуляторна батарея у даний момент часу до її початкової у-кількості (SoH), напруга холостого ходу (OCV), внутрішній опір і пусковий струм. На ринку представлені тестери від різних виробників, зокрема Foxsur, Autel, Autool та інших. Технічні показники нових свинцево-

кислотних акумуляторних батарей повинні відповідати міжнародному стандарту [1]. Кожен із показників містить певну діагностичну інформацію. Хоча деякі з них взаємопов'язані, рівень їх кореляції недостатній для обґрунтованого виключення будь-якого з параметрів.

У роботі [2] запропоновано здійснювати комплексну оцінку технічного стану стартерних акумуляторних батарей на основі таких показників, як стан заряду (SoC) і стан здоров'я (SoH). На наш погляд, такий підхід не забезпечує повного відображення технічного стану свинцево-кислотної акумуляторної батареї, оскільки основне завдання цієї батареї є забезпечення необхідного пускового стуму протягом короткого часу. Пусковий струм, у свою чергу, залежить від технічних характеристик двигуна внутрішнього згорання. Тому для свинцево-кислотних акумуляторних батарей більш важливою характеристикою є холодний пусковий струм CCA.

При роботі з великою кількістю інформації вимірних діагностичних параметрів краще автоматизувати процес з використанням обчислювальних систем чи використання штучного інтелекту. Сьогодні широко використовують нейромережі для оцінки залишкового ресурсу свинцево-кислотних акумуляторних батарей [3–10].

Штучний інтелект показує високу ефективність оцінки залишкового ресурсу свинцево-кислотних батарей з використанням багатоварових нейронних мереж MLP [3], згорткових нейронних мереж CNN [3, 4], Байєсівських моделей [5], нейромереж з довго та короткотерміновою пам'яттю LSTM [6] та гібридних нейромереж [7–10]. Найчастіше об'єктами моделювання є параметри акумуляторних батарей SoH і RUL. Більшість моделей забезпечують середню чи високу точність оцінки залишкового ресурсу акумуляторних батарей. Перевагою є можливість онлайн-прогнозу без відключення батареї [3, 6], що значно розширює можливості застосування таких методів у автономному режимі роботи транспортного засобу.

Попередні дослідження авторів по діагностуванню стартерних свинцево-кислотних акумуляторних опубліковані у роботі [11].

На українських автосервісах є доцільним використання більш простих методик комплексного діагностування свинцево-кислотних акумуляторних батарей на основі даних вимірних за допомогою сучасних діагностичних приладів. Тому, доцільно застосовувати комплексну оцінку залишкового ресурсу акумуляторних батарей на основі інтегрального критерію, в якому вагомість впливу кожного фактора визначається із використанням методів штучного інтелекту.

Метою роботи є обґрунтування інтегрального критерію оцінювання залишкового ресурсу свинцево-кислотних акумуляторних батарей, що включає вплив стану здоров'я SoH, стану заряду SoC, внутрішнього опору, напруги холостого ходу OCV та пускового струму, де рівень впливу кожного критерію визначається за допомогою різних платформ штучного інтелекту.

Оцінювання акумуляторних батарей шляхом визначення інтегрального показника залишкового ресурсу дає змогу мінімізувати вплив людського чинника та забезпечує передумови для автоматизації діагностичного процесу.

Для проведення досліджень свинцево-кислотні акумуляторні батареї з різними рівнями технічного стану попередньо заряджали та витримували протягом 24 годин з метою стабілізації їх електричних і експлуатаційних параметрів. Визначення стану заряду (SoC), стану здоров'я (SoH), напруги холостого ходу (OCV), внутрішнього опору та пускового струму здійснювали за допомогою вимірювального пристрою Foxsur FBT-300 (12/24 В).

Для визначення інтегрального показника залишкового ресурсу була запропонована формула:

$$I = k_1 SoH_n + k_2 r_n + k_3 CCA_n + k_4 OCV_n + k_5 SoC_n \quad (1)$$

де SoH_n – нормалізоване значення стану здоров'я акумуляторної батареї, ч. од; r_n – нормалізоване значення внутрішнього опору, ч. од; CCA_n – нормалізоване значення струму холодного запуску ДВЗ, ч. од; OCV_n – нормалізоване значення напруги холостого ходу, ч. од; SoC_n – нормалізоване значення стану заряду, ч. од; k_1, k_2, k_3, k_4 та k_5 – коефіцієнти впливу відповідних показників на інтегральний показник залишкового ресурсу акумуляторної батареї.

Нормалізація виміряних даних для спадних показників (SoC, SoH, CCA, OCV) була виконана за формулою

$$X_n = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (2)$$

де x – виміряне значення показника; $x_{\max}$ – максимально можливе значення показника; $x_{\min}$ – мінімальне значення показника.

Нормалізація виміряних значень внутрішнього опору r , як зростаючого показник була виконана за формулою

$$X_n = 1 - \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

Мінімальні та максимальні значення показників, що вимірювалися для оцінки залишкового ресурсу акумуляторних батарей наведені у таблиці 1

Таблиця 1.

Мінімальні та максимальні значення показників, що вимірювалися для оцінки залишкового ресурсу акумуляторних батарей

Показник	$x_{\min}$	$x_{\max}$
Стан здоров'я (SoH), %	25	100
Внутрішній опір, мОм	3	20
Струм холодного запуску ДВЗ CCA, А	250	значення вказане на акумуляторній батареї
Напруга холостого ходу, В	11,8	12,9
Стан заряду (SoC), %	60	100

Якщо стан заряду свинцево-кислотної акумуляторної батареї нижчий за 60 %, то її потрібно зарядити для виконання діагностичних досліджень.

Для визначення інтегрального показника залишкового ресурсу акумуляторної батареї було написано промпт для штучного інтелекту: «Ви експерт автоелектрик. Яку частку впливу на показник залишкового ресурсу стартерної свинцево-кислотної акумуляторної батареї будуть мати такі показники: стан заряду SoC, стан здоров'я SoH, напруга холостого ходу, внутрішній опір, електричний струм холодного запуску CCA. Вказані показники нормалізовані по максимальному і мінімальному значенням. Відповідь підготуй у частках одиниці».

Запити проводилися з різних акаунтів з повторами протягом 6–8 квітня 2026 року. Отримані результати відображені у таблиці 2.

Таблиця 2.

Коефіцієнти впливу показників свинцево-кислотних акумуляторних батарей на інтегральний показник залишкового ресурсу

Показник	Коефіцієнти впливу, ч. од.			Середнє значення, ч. од.	Коефіцієнт варіації, %
	ChatGPT	Gemini	Deepseek		
Нормалізований стан здоров'я (SoH)	0,375	0,375	0,450	0,400	11,18
Нормалізований внутрішній опір	0,250	0,225	0,225	0,233	11,07
Нормалізований CCA	0,200	0,225	0,150	0,192	19,64
Нормалізована напруга холостого ходу	0,110	0,075	0,110	0,098	26,06
Нормалізований стан заряду (SoC)	0,065	0,100	0,065	0,077	29,36
Сума	1,000	1,000	1,000	1,000	

Отримане рівняння після підстановки значень коефіцієнтів впливу різних показників має вигляд:

$$I = 0,40SoH_n + 0,233r_n + 0,192CCA_n + 0,098OCV_n + 0,077SoC_n \quad (4)$$

Інтегральний критерій залишкового ресурсу акумуляторних батарей різного технічного стану був розрахований за отриманою формулою (4) результати зведені до таблиці 3.

Коефіцієнт кореляції між інтегральним критерієм залишкового ресурсу та станом здоров'я SoH свинцево-кислотної акумуляторної батареї становить 0,891, що свідчить про тісний зв'язок між цими параметрами. Максимальне відхилення інтегрального критерію залишкового становить 24,1%. Таким чином інтегральний критерій залишкового ресурсу свинцево-кислотної акумуляторної батареї дає можливість більш точно визначити її придатність до використання. Граничне значення показника залишкового

ресурсу акумуляторної батареї становить 0,287 ч. од. відповідно до отриманих результатів досліджень.

Таблиця 3.

Значення інтегрального критерію залишкового ресурсу свинцево-кислотних акумуляторних батарей різного технічного стану

Тип акумуляторних батарей	SoH, %	r, мОм	SoC, %	OCV, В	CCA, А	Значення інтегрального показника залишкового ресурсу
Акумуляторна батарея INTER 60 Ah, CCA 480 А	26	10,17	76	12,51	258	0,241
Акумуляторна батарея EURO REPAIR 60 Ah, CCA 540 А	35	8,64	60	12,14	322	0,287
Акумуляторна батарея GIGAVAT 110 Ah, CCA 920 А	62	4,01	82	12,63	661	0,668
Акумуляторна батарея BOSCH 100 Ah, CCA 830 А	65	3,64	100	12,90	753	0,757
Акумуляторна батарея Varta Blue Dynamic 60 Ah, CCA 540 А	50	7,40	75	12,50	388	0,489
Акумуляторна батарея ISTOK 60 Ah, CCA 540 А	10	16,05	75	12,50	179	0,145
Акумуляторна батарея Auto Part Batary 100 Ah, CCA 850 А	36	5,46	80	12,57	528	0,454
Акумуляторна батарея BOSCH 45 Ah, CCA 330 А (допоміжна батарея електромобіля)	83	9,28	65	12,23	303	0,631
Акумуляторна батарея INCI ACU MAXIM A 80 Ah, CCA 650 А	73	6,38	60	12,15	428	0,559

Враховуючи отримані результати стартерні свинцево-кислотні акумуляторні батареї за придатністю до експлуатації можна розділити на три групи за інтегральним критерієм залишкового ресурсу:

1. Інтегральний критерій залишкового ресурсу 0,60–1,0 – акумуляторна батарея придатна для надійної експлуатації;

2. Інтегральний критерій залишкового ресурсу 0,30–0,6 – акумуляторна батарея придатна для експлуатації, у літній період. У зимовий період може бути відмова;

3. Інтегральний критерій залишкового ресурсу 0–0,3 – акумуляторна батарея не придатна для експлуатації як стартерна для транспортного засобу;

Отже, застосування інтегрального показника залишкового ресурсу, що враховує сукупний вплив кількох вимірних діагностичних параметрів стартерної свинцево-кислотних акумуляторних батарей, із визначенням вагомості кожного чинника засобами штучного інтелекту, забезпечує можливість проведення діагностики без участі людського фактору. Із накопиченням науково-практичних даних методика може вдосконалюватися шляхом коригування вагових коефіцієнтів.

1. IEC 60095-1:2018. Lead-acid starter batteries - Part 1: General requirements and methods of test. International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, 2018. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/100260/bff159d5fd8a4c3ab6ade9f1e0930c44/IEC-60095-1-2018.pdf>. 2. H. Makogon, R. Suchko, V. Moskalenko, I. Kalinin, S. Burdin, V. Iksarytsia. Application of the correlation analysis mathematical apparatus for determination the lead-acid batteries management and status control minimum diagnosis. *Advanced Information Systems*. Vol. 5, No. 1. Kharkiv, 2021. P. 129–135. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.19>. 3. Chevtchenko S., Rocha É., Cruz B., Andrade E., De Ara'ujo D. (2023). A Mapping Study of Machine Learning Methods for Remaining Useful Life Estimation of Lead-Acid Batteries. *ArXiv, abs/2307.05163*. 2023. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2307.05163>. 4. Srinivaas A., Sakthivel N., Nair B. (2025). Machine Learning Approaches for Fault Detection in Internal Combustion Engines: A Review and Experimental Investigation. *Informatics*, 12, 25. <https://doi.org/10.3390/informatics12010025>. 5. Wang Z. H., Horng G., Wu H., Jong G. A prediction method for voltage and lifetime of lead-acid battery by using machine learning. *Energy Exploration & Exploitation*, 38. 2020. P. 310 - 329. <https://doi.org/10.1177/0144598719881223>. 6. Voronov S., Krysender M., Frisk E. Predictive Maintenance of Lead-Acid Batteries with Sparse Vehicle Operational Data. *International Journal of Prognostics and Health Management*. 2023. <https://doi.org/10.36001/ijphm.2020.v11i1.2608>. 7. Prabhu C., Jayalakshmi J., KaviPriya S., Mounika S. Lead Acid Battery Optimization and Fault Prediction using IoT. *2025 5th International Conference on Trends in*

Material Science and Inventive Materials (ICTMIM). 2025. P. 973-978. <https://doi.org/10.1109/ictmim65579.2025.10988378>. **8.** Sekhar J., Domathoti B., Gonzalez E. Prediction of Battery Remaining Useful Life Using Machine Learning Algorithms. *Sustainability*. 2023. <https://doi.org/10.3390/su152115283>. **9.** Bhalaji N., Chowdhury R. Remaining Useful Life (RUL) Estimation of Lead Acid Battery using Bayesian Approach. *Journal of Electrical Engineering and Automation*. 2020. P. 25–34. <https://doi.org/10.36548/jeea.2020.1.003>. **10.** Ng M., Zhao J., Yan Q., Conduit G., Seh Z. Predicting the state of charge and health of batteries using data-driven machine learning. *Nature Machine Intelligence*, 2. 2020. P. 161 - 170. <https://doi.org/10.1038/s42256-020-0156-7>. **11.** Стадник О.С., Морозюк С.В. Діагностування свинцево-кислотних акумуляторних батарей з використанням штучного інтелекту. *Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту : матеріали XIV міжнародної науково-технічної інтернет-конференції (Вінниця, 14-16 квітня 2026 року)* Вінниця : ВНТУ, 2026. С. 486-488.

REFERENCES

1. IEC 60095-1:2018. Lead-acid starter batteries - Part 1: General requirements and methods of test. International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, 2018. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/100260/bff159d5fd8a4c3ab6ade9f1e0930c44/IEC-60095-1-2018.pdf>. **2.** H. Makogon, R. Suchko, V. Moskalenko, I. Kalinin, S. Burdin, V. Iksarytsia. Application of the correlation analysis mathematical apparatus for determination the lead-acid batteries management and status control minimum diagnosis. *Advanced Information Systems*. Vol. 5, No. 1. Kharkiv, 2021. P. 129–135. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.19>. **3.** Chevtchenko S., Rocha É., Cruz B., Andrade E., De Ara'ujo D. (2023). A Mapping Study of Machine Learning Methods for Remaining Useful Life Estimation of Lead-Acid Batteries. *ArXiv, abs/2307.05163*. 2023. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2307.05163>. **4.** Srinivaas A., Sakthivel N., Nair B. (2025). Machine Learning Approaches for Fault Detection in Internal Combustion Engines: A Review and Experimental Investigation. *Informatics*, 12, 25. <https://doi.org/10.3390/informatics12010025>. **5.** Wang Z. H., Horng G., Wu H., Jong G. A prediction method for voltage and lifetime of lead-acid battery by using machine learning. *Energy Exploration & Exploitation*, 38. 2020. P. 310 - 329. <https://doi.org/10.1177/0144598719881223>. **6.** Voronov S., Krysender M., Frisk E. Predictive Maintenance of Lead-Acid Batteries with Sparse Vehicle Operational Data. *International Journal of Prognostics and Health Management*. 2023. <https://doi.org/10.36001/ijphm.2020.v11i1.2608>. **7.** Prabhu C., Jayalakshmi J., KaviPriya S., Mounika S. Lead Acid Battery Optimization and

Fault Prediction using IoT. *2025 5th International Conference on Trends in Material Science and Inventive Materials (ICTMIM)*. 2025. P. 973-978. <https://doi.org/10.1109/ictmim65579.2025.10988378>. **8.** Sekhar J., Domathoti B., Gonzalez E. Prediction of Battery Remaining Useful Life Using Machine Learning Algorithms. *Sustainability*. 2023. <https://doi.org/10.3390/su152115283>. **9.** Bhalaji N., Chowdhury R. Remaining Useful Life (RUL) Estimation of Lead Acid Battery using Bayesian Approach. *Journal of Electrical Engineering and Automation*. 2020. P. 25–34. <https://doi.org/10.36548/jeea.2020.1.003>. **10.** Ng M., Zhao J., Yan Q., Conduit G., Seh Z. Predicting the state of charge and health of batteries using data-driven machine learning. *Nature Machine Intelligence*, 2. 2020. P. 161 - 170. <https://doi.org/10.1038/s42256-020-0156-7>. **11.** Stadnyk O.S., Moroziuk S.V. (2026) Diagnostics of lead-acid batteries using artificial intelligence. *Problems and prospects for the development of road transport: materials of the XIV International Scientific and Technical Internet Conference (Vinnytsia, April 14-16, 2026)*. Vinnytsia. P. 486-488.

Stadnyk O. S., (1:ORCID: 0000-0002-9066-3806)

Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor

Moroziuk S. V., (1:ORCID: 0000-0002-8904-9614)

Senior Lecturer

Ihnatiuk R. M., (1:ORCID: 0000-0002-1004-1469)

Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor

Ryzhyi O. P., (1:ORCID: 0000-0002-8592-1217)

Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor

Serilko L. S., (1:ORCID: 0000-0002-2396-561X)

Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor

¹ National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

STARTER BATTERYS DIAGNOSTICS WITH USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The article considered the use of artificial intelligence for diagnosing starter lead-acid batteries of vehicles. The relevance of the study is due to the need to increase the accuracy of assessing the technical condition of batteries and automate the process of making diagnostic decisions. Modern approaches to predicting the remaining life of batteries using neural networks, machine learning and other intelligent methods are analyzed.

The aim of the work is to substantiate the integral criterion for assessing the remaining life of starter lead-acid batteries based on such parameters as battery health (SoH), state of charge (SoC), internal resistance, open circuit voltage (OCV) and engine cold start current (CCA).

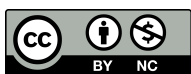
The weighting factors of the parameters were determined using the ChatGPT, Gemini and DeepSeek artificial intelligence platforms, which were used as expert systems.

Experimental studies were conducted on lead-acid batteries of various technical conditions using the Foxsur FBT-300 diagnostic device. It was found that the state of health of the battery and its internal resistance have the greatest impact on the integral indicator of the residual resource. A high correlation coefficient was obtained between the integral criterion and the SoH indicator, which confirms the reliability of the proposed approach.

According to the results of the studies, a classification of batteries by suitability for operation was proposed: with an integral criterion value of 0.60–1.00, the battery is suitable for reliable operation; within 0.30–0.60 - suitable for operation with possible failures in the winter period; with a value less than 0.30 - unsuitable for use as a starter. The limiting value of the integral indicator of the residual resource is 0.287. The proposed method can be used to automate the diagnosis of batteries at motor transport enterprises and service stations.

Keywords: lead-acid battery, residual life, artificial intelligence, integral criterion, state of health (SoH), starting current

Отримано: 29 березня 2026 року
Прорецензовано: 29 квітня 2026 року
рийнято до друку: 29 травня 2026 року



© 2026 [Stadnyk O. S., Moroziuk S. V., Ihnatiuk R. M., Ryzhyi O. P., Serilko L. S.]. 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](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)).