

References

1. Hlushkov V.M., Kovalchuk O.V. Electric Vehicles: Technical Solutions and Development Prospects. – Kyiv: Tekhnika, 2020.
2. Sergienko A.N. Analysis of Designs of Electromechanical Converters and Selection of the Scheme of an Electroshock Absorber for Unsprung Masses of a Vehicle / A.N. Sergienko, B.G. Lyubarsky, N.E. Sergienko et al. // Automobile Transport. – Kharkiv: KhNADU Publishing / Collection of Scientific Papers. – 2012. – Issue 31.
3. Sergienko, N., Kuznetsov, V., Lyubarskyi, B. Study of the Two-Rotor Electric Motor of a Drive of Vehicle Drive Wheels // Archives of Transport, 2021, 60(4), 245–257. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.6933>
4. Patent of Ukraine No. 93154. IPC F03G7/08, B60K 25/00. Device for Energy Recuperation from Vehicle Oscillations / Sergienko N.Ye., Khudolii A.I., Sergienko A.N.; Applicant and Patent Holder: NTU “KhPI”. – No. a200912230; filed 27.11.09; published 10.01.11, Bulletin No. 1.

УДК 629.113

ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ БЛИЗНЮКІВ У ПРОГНОЗУВАННІ СТАНУ АВТОМОБІЛЬНИХ СИСТЕМ

Хвостішко Дмитро Романович, магістрант кафедри інжинірингу систем автомобільного транспорту ім. Говоруценка М.Я., Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Павленко В'ячеслав Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри інжинірингу систем автомобільного транспорту ім. Говоруценка М.Я., Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: vp.khadi@gmail.com, ORCID: [0000-0003-0796-4307](https://orcid.org/0000-0003-0796-4307)

Надійність, безпека та ефективність експлуатації транспортних засобів є фундаментальними вимогами сучасної автомобільної індустрії. Традиційні методи технічного обслуговування, які ґрунтуються на регламентованих термінах або реактивному ремонті після виникнення несправності, призводять до значних економічних втрат, незапланованих простоїв та, що найважливіше, можуть поставити під загрозу безпеку учасників дорожнього руху.

Сучасні автомобілі являють собою складні кіберфізичні системи, обладнані сотнями сенсорів і електронних блоків керування (ECU), які генерують величезні обсяги даних. Використання цих даних для проактивного управління станом систем стало ключовим завданням. В цьому контексті технологія цифрових близнюків (ЦБ), або Digital Twins (DT), набуває вирішального значення.

Цифровий близнюк – це віртуальна копія фізичного об'єкта, процесу або системи, яка підтримує синхронний зв'язок зі своїм реальним аналогом [1]. У

сфері автомобілебудування ЦБ дозволяє не просто моніторити поточний стан, а й створювати моделі для симуляції майбутнього функціонування, прогнозувати відмови, оцінювати залишковий ресурс компонентів і оптимізувати експлуатаційні характеристики.

Метою роботи є дослідження концепції та архітектурних рішень застосування ЦБ для точного та своєчасного прогнозування стану ключових автомобільних систем, а також аналіз пов'язаних з цим технологічних викликів і переваг.

Цифровий Близнюк автомобільної системи виходить далеко за рамки простої 3D-моделі. Він є динамічною, багатовимірною віртуальною репрезентацією, яка складається з трьох основних елементів:

1. Фізичний об'єкт (Автомобільна система) – реальний компонент (двигун, акумулятор, гальмівна система) або цілий транспортний засіб, обладнаний сенсорами;

2. Віртуальна модель (Цифровий близнюк) – комп'ютерна модель, що інтегрує фізичні, хімічні, механічні та термічні закони (фізично обґрунтовані моделі), а також моделі, засновані на даних (машинне навчання). Ця модель емулює поведінку фізичного об'єкта в реальному часі;

3. Зв'язок даних – двонаправлений потік даних. Дані з фізичного об'єкта (через шину CAN, телематичні модулі, IoT-сенсори) надходять до віртуальної моделі для оновлення її стану. У свою чергу, результати симуляції та прогнозів із віртуальної моделі можуть бути використані для коригування роботи фізичної системи (наприклад, через оновлення прошивки ECU).

Створення ЦБ вимагає об'єднання високоточних інженерних даних (CAD/CAE), історичних експлуатаційних даних (пробіг, кліматичні умови, стиль водіння) та даних у реальному часі. Висока точність (fidelity) моделі є критично важливою, оскільки будь-яка неточність у моделі призведе до помилкових прогнозів.

Технологія ЦБ відкриває можливості для переходу від превентивного (за графіком) до прогнозного технічного обслуговування (Predictive Maintenance, PdM), значно підвищуючи ефективність і знижуючи ризики [2].

Прогнозування стану акумуляторних систем (BMS). В електромобілях і гібридах акумуляторна батарея є найдорожчим компонентом. ЦБ батареї інтегрує дані про температуру елементів, струм заряду/розряду та напругу. Використовуючи термодинамічні моделі та алгоритми машинного навчання (наприклад, рекурентні нейронні мережі – RNN), ЦБ може прогнозувати:

– держава здоров'я (State of Health, SoH) – Залишкову ємність і загальну деградацію;

– час до відмови (Time to Failure) – Прогнозування теплового розгону або критичної втрати потужності, що дозволяє замінити або відновити елементи заздалегідь.

Прогнозування стану двигуна та трансмісії. ЦБ силового агрегату аналізує вібраційні, температурні та тискові дані. Модель може виявити аномалії, які вказують на:

– початок зносу підшипників трансмісії (за частотним аналізом вібрацій);

- засмічення паливних форсунок або деградацію масла (за зміною робочих параметрів і динаміки прискорення);
- ЦБ прогнозує оптимальний момент для заміни масла або фільтрів, мінімізуючи простої.

Прогнозування стану гальмівної системи та підвіски: ЦБ підвіски використовує дані акселерометрів, гіроскопів та сенсорів ходу для оцінки стану амортизаторів, шин та стабілізаторів. Це дозволяє:

- прогнозувати критичний знос гальмівних колодок, ґрунтуючись на стилі водіння (агресивність гальмування, частота спрацювання ABS);
- оптимізувати налаштування активної підвіски під фактичні умови експлуатації та знос компонентів.

Для успішного функціонування ЦБ необхідна інтеграція складних технологій обробки даних і моделювання:

1. Збір даних та IoT: Дані збираються через бортову діагностику (OBD-II), шину CAN та телематичні пристрої. Використовуються технології Інтернету речей (IoT) та хмарні платформи для агрегації та попередньої обробки потоків даних у реальному часі;

2. Гібридне моделювання: Найефективніші ЦБ використовують гібридний підхід:

- фізичні моделі (Physics-based) – використовують закони термодинаміки, механіки рідин і матеріалознавства для симуляції ідеальної або зношеної поведінки компонентів;

- моделі, засновані на даних (Data-driven) – застосування методів Машинного Навчання (ML), таких як нейронні мережі (зокрема, LSTM для аналізу часових рядів і прогнозування) та алгоритми опорних векторів (SVM), для виявлення прихованих кореляцій у даних про відмови.

3. Прогнозування та Рекомендації:

- моделі ML навчаються на історичних даних про відмови, щоб ідентифікувати ранні ознаки аномалій (Anomalies Detection);

- для прогнозування використовують методи регресії та аналізу виживаності (Survival Analysis) для оцінки залишкового терміну служби (Remaining Useful Life, RUL). Наприклад, якщо вібрації підшипника зростають за певним експоненційним трендом, ЦБ може точно передбачити, коли цей тренд перетне критичний поріг відмови.

4. Хмарні обчислення та Edge Computing: Оскільки прогнозні моделі вимагають значних обчислювальних ресурсів, більша частина складної обробки даних та навчання моделей відбувається у хмарі. Однак, базовий моніторинг та первинна фільтрація даних часто виконуються на граничних обчисленнях (Edge Computing) – безпосередньо в автомобілі або на телематичному пристрої, що зменшує затримку (latency) та обсяг переданих даних.

Висновки

Інтегруючи фізично обґрунтовані моделі з передовими алгоритмами машинного навчання (ML) і потоками даних IoT, ЦБ забезпечує

безпрецедентний рівень точності в оцінці залишкового терміну служби (RUL) критично важливих компонентів. Хоча впровадження ЦБ вимагає значних інвестицій у кібербезпеку, обчислювальну інфраструктуру та розробку високоточних моделей, переваги у вигляді зниження експлуатаційних витрат, мінімізації простоїв та, головне, істотного підвищення безпеки експлуатації, роблять цю технологію ключовим напрямком розвитку сучасного автомобілебудування та галузі транспорту в цілому.

Література

4. Grieves, M. W. (2014). Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. White Paper. Florida Institute of Technology.

5. Tao, F., Zhang, H., Liu, F., & Nie, L. (2018). Digital Twin Driven Manufacturing Innovation and Practice. Journal of Manufacturing Systems, 48(B), 1-13.

УДК 658.5

МОЖЛИВОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВ УКРАЇНИ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ ІНДУСТРІЇ 4.0

Болдовський Володимир Миколайович, к.т.н., доцент кафедри Технології машинобудування і ремонту машин
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: v.boldovskyi@khai.edu, ORCID: [0009-0008-5069-756X](https://orcid.org/0009-0008-5069-756X)

Машинобудування є ключовою галуззю промисловості України, що формує технічну базу для більшості секторів економіки – транспорту, енергетики, сільського господарства, оборонного комплексу. Проте більшість підприємств функціонує на застарілому обладнанні, із низьким рівнем автоматизації та недостатньою цифровізацією управління виробництвом [1].

В умовах глобальної конкуренції та технологічних змін актуальною є потреба у модернізації машинобудівних підприємств на засадах Індустрії 4.0, що передбачає поєднання фізичного та цифрового середовищ виробництва в єдину інтегровану систему [2, 3].

Індустрія 4.0 – це нова парадигма розвитку промисловості, що базується на взаємодії кіберфізичних систем, інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI), великих даних (Big Data), хмарних сервісів, робототехніки та адитивних технологій.

Основні напрями впровадження Індустрії 4.0 у машинобудуванні включають: цифрове проектування (CAD/CAM/CAE), інтернет речей (IoT), кіберфізичні системи, штучний інтелект, 3D-друк і адитивне виробництво, віртуальна та доповнена реальність (VR/AR).