

## ОСОБЛИВОСТІ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧОЇ СИСТЕМИ ГІБРИДНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК АВТОМОБІЛЯ

Бажинова Т. О.  
АВЛ Ліст ТОВ, Австрія

*Анотація* Запропоновано модуль синтезу оптимальних програм для отримання єдиної програми об'єкта. Динаміка керованого процесу подана як багатозонна модель. Модуль працює на підставі методики стикування складників багатозонної моделі. Унаслідок кожної зміни стану функціонування в реальному часі розраховується нове оптимальне керування для наявних показників задачі оптимального керування (ЗОК) на поточний момент часу. Математичне забезпечення режиму «рекуперація» використовує методи штучного інтелекту, що також дає змогу ухвалювати рішення щодо керування вантажно-швидкісним режимом силової установки, які важко формалізуються, у реальному режимі часу.

*Ключові слова:* гібрид, силова установка, метод, система, рух, рекуперація.

### Вступ

Ефективність роботи силової установки здебільшого визначається характеристиками інформаційно-керуючої системи (ІКС) гібридних автомобілів, що забезпечує керування потоками потужності в їх силових установках і рекуперації енергії до тягової акумуляторної батареї (ТАБ). У процесі експлуатації гібридних автомобілів їх енергоефективність та екологічна безпека найчастіше визначається якістю керування силовою установкою та ступенем відповідності обраної стратегії керування з огляду на зовнішні умови експлуатації.

Ця обставина приводить до необхідності надання силовим установкам адаптивних якостей, тобто здатність вибору стратегії управління агрегатами силової установки, яка мінімізує обраний функціонал якості, зважаючи на зовнішні обставини роботи в разі заданих обмежень. Дотепер низка особливостей ІКС силових установок гібридних автомобілів залишається не дослідженою.

Методи аналізу та синтезу, що застосовуються, не приділяють достатньої уваги багатокритеріальності оптимізаційних завдань, що виникають. Методи адаптації управління до мінливих зовнішніх умов експлуатації є недостатньо ефективними. Окреслені обставини не дають змогу повною мірою розкрити потенційні можливості ІКС силових установок електро- та гібридних автомобілів. Це визначає актуальність удосконалення та розроблення нових методів моделювання й оптимізації ІКС управління силовими установками гібридних автомобілів на основі сучасної теорії автоматичного керування, векторної

оптимізації, нейромережного та нейронечіткого адаптивного управління.

### Аналіз публікацій

Низка авторів, зокрема [1, 4], досліджуючи управління силовими установками автомобілів, упроваджують методи штучного інтелекту. Управління на підставі нечітких правил і систем нечіткого висновку використовується в роботах [2, 6], а в студіях [3–7] досліджується можливість використання генетичних алгоритмів для налагодження систем нечіткого висновку. Застосування штучних нейронних мереж в управлінні силовою установкою наведено в працях [3, 14]. Сумісному використанню ШНМ та систем нечіткого висновку присвячені роботи [5, 10]. Розглянуті дослідження вказують на значний потенціал покращення експлуатаційних характеристик гібридних автомобілів на підставі ефективного управління потужністю за умов застосування технологій штучного інтелекту.

Є три підходи до побудови силових установок гібридних автомобілів, які розрізняються за принципами реалізації стратегії управління в процесі розв'язання другого рівня ієрархії. Це використання логічних правил вибору стратегії або методів теорії оптимального управління та алгоритмів адаптації до зовнішніх умов експлуатації гібридних та електромобілів.

На практиці поширеним є вибір стратегії управління силовою установкою на підставі логічних правил і табличне задання законів регулювання (*logic based control strategies*). Такий підхід називається *Rule Based (RB)* – «оснований на правилах» [8, 9].

Правила та закони управління встановлюють розробники силових установок способом упровадження евристичних методів і аналізу результатів розрахункового експерименту. У цьому разі не беруться до уваги особливості конкретних умов експлуатації, що впливають на ефективність роботи силової установки. Отже, такий підхід не дає змоги використовувати повною мірою енергоефективність силової установки. Якщо стратегія управління не відповідає зовнішнім умовам роботи автомобіля, то силова установка може мати гірші показники енергетичної економічності та токсичності відпрацьованих газів порівняно з базовим автомобілем.

Логіка функціонування силової установки може задаватися за допомогою бази нечітких правил і використовувати систему нечіткого висновку. Також для апроксимації законів регулювання або характеристик агрегатів застосовується ІНМ [12, 15].

Принцип управління на підставі логічних правил упроваджується в силових установках більшості гібридних та електромобілів. У роботах [11, 13] використано штучні нейронні мережі в системі управління силовою установкою транспортного засобу з метою зменшення витрати енергії та *offline*-діагностики технічного стану тягової акумуляторної батареї. За допомогою симулятора навчається нейромережна модель автомобіля, яка використовується для *offline*-навчання нейроконтролера. Якість навчання нейроконтролера визначається симулятором.

#### **Мета та постановка завдання**

Мета роботи – підвищення ефективності застосування засобів транспорту завдяки забезпеченню ресурсо- та енергозбереження способом розроблення та впровадження методології побудови інтелектуальної інформаційно-керуючої системи інваріантної різним силовим установкам гібридних автомобілів, що дає змогу швидко синтезувати керівний вплив за енергетичними та якісними критеріями з огляду на вантажно-швидкісний режим ГСУ.

Для досягнення поставленої мети розроблено методологію побудови ІКС інваріантну різним силовим установкам гібридних автомобілів для оперативного управління режимами за якісними, енергетичними та іншими критеріями.

#### **Енергозберігальне керування гібридною силовою установкою**

Робочі прототипи ІКС ГСУ будуються на базі дослідницького прототипу ІКС гібридного автомобіля. У цьому разі ідентифікується модель предметної галузі робочого прототипу конкретного гібридного автомобіля. Визначаються необхідні підсистеми, формуються бази даних і знань. Для цього за допомогою переміщення по стратах інтегрованого графа технології алгоритмізації синтезу керівних впливів із загальної множини інформаційних елементів, алгоритмів, функціональних програмних модулів, технічних засобів з огляду на множину критеріїв і обмежень, розв'язуючи задачу знаходження проектного рішення, визначається робочий прототип ІКС ГСУ.

На стадії технічного проектування ГСУ особлива увага приділяється створенню математичного, програмного, інформаційного, інтелектуального, технічного забезпечення системи й метрологічному аналізу.

Математичний апарат і побудовані на його основі алгоритми та методи визначають можливість ІКС ГСУ без особи, яка приймає рішення, у реальному режимі часу виробляти керівний вплив. Оперативна реалізація керівного впливу, що мінімізує енерго- або ресурсоспоживання в режимі роботи «рекуперація» і втрати якості та продуктивності в режимі «рух», є основною функціональною можливістю проектованої системи.

Пропоноване математичне забезпечення режиму «рекуперація», на відміну від класичних задач оптимального керування (ЗОК), допускає зміну параметрів об'єкта, виду його моделі, граничних значень для керівних впливів і фазових координат, тобто зміну масиву реквізитів ЗОК на часовому інтервалі керування. За кожної зміни стану функціонування в реальному часі розраховується нове оптимальне керування для наявних показників ЗОК на поточний момент часу. Математичне забезпечення ІКС ГСУ охоплює математичний апарат аналізу та синтезу оптимального керування, що дає змогу значно знизити розмірність задачі, а отже, сприяє роботі керуючого пристрою в реальному масштабі часу. Математичне забезпечення режиму «рух» використовує методи штучного інтелекту, що також дає змогу ухвалювати рішення щодо керування вантажно-швидкісним режимом силової установки, які важко формалізуються у реальному режимі часу.

Математичний апарат лежить в основі бази знань та ключових функціональних програмних модулів дослідницького прототипу ІКС ГСУ. Одним із завдань побудови робочого прототипу ІКС ГСУ є вибір множини необхідного математичного забезпечення із загальної множини математичного забезпечення дослідницького прототипу.

Під час створення програмного забезпечення ІКС ГСУ було використано об'єктно-орієнтований підхід, однією з основних переваг якого є можливість розробити компоненти один раз і багаторазово їх застосовувати. Ця перевага сприяє швидкій побудові робочого прототипу на основі дослідницького, інваріантного різним ГСУ.

Прототипи ІКС ГСУ розробляються в межах спіральної моделі життєвого циклу інформаційних систем відповідно до стандарту ISO 26262. Нині під час розроблення об'єктно-орієнтованих інформаційних систем часто використовують промисловий стандарт нотації уніфікованої мови моделювання UML (*unified modeling language*).

Це дає змогу швидко зважати на особливості проєктованих ІКС ГСУ на стадії моделювання та створювати адекватні архітектури. Засоби деяких інструментальних середовищ мови UML дають змогу генерувати «скелетний програмний код» значною кількістю різноманітних мов, а також виконувати зворотне проєктування коду, створюючи в такий спосіб моделі вже наявних систем.

Під час проєктування баз даних ІКС ГСУ застосовувалися реляційні моделі, які створювалися з використанням CASE-засобу *ERwin 4.0 (Computer Associates)*. У створенні функціональних моделей ІКС ГСУ застосовувався CASE-засіб *BPwin 4.0 (Computer Associates)*.

Проєктування функціонування дослідницького прототипу ГСУ може здійснюватися на базі таких операційних систем, як *Microsoft Windows, Linux*. У разі необхідності внесення змін до програмного коду рекомендується використовувати середовище візуального програмування. Робочий прототип функціонує на основі платформи обраних технічних засобів.

Ядром програмного забезпечення ГСУ є база знань, процедурні знання в якій подані у вигляді фреймів, що реалізують алгоритмічне забезпечення ІКС ГСУ. База знань має стратифіковану, ієрархічну структуру, що відтворює інтегрований граф технології синтезу рішення ЗОК. Зміст фреймів бази знань забезпечує пошук розв'язання задачі ЗОК у просторі станів.

У фреймах є слоти, що містять не тільки конкретні дані, а й імена процедур, що їх обробляють за заданим алгоритмом. Деякі фрейми містять слоти, заповнювачами яких є правила продукції. Під час створення бази знань дослідницького прототипу проводилася робота з уніфікації імен фреймів, що дає змогу оперативно будувати бази знань робочих прототипів.

Фрейми знань є набором класів, розроблених у середовищі візуального програмування.

ІКС ГСУ зручна для користувачів інтерфейсу. Інтерфейс забезпечує роботу користувача дослідницького прототипу ІКС ГСУ в окремих функціональних модулях. Він містить значну кількість різноманітних меню: вертикальних, горизонтальних, кнопкових, діалогових вікон, вікон редагування інформації, що супроводжується контекстною підказкою, а також когнітивних графічних засобів відтворення інформації, реалізованих на різних рівнях роботи.

Об'єктно-орієнтований підхід, що використовується, дає змогу створювати програмне забезпечення функціональних модулів, баз даних і знань. Основними за функціональним навантаженням програмними модулями дослідницького прототипу ІКС ГСУ є такі:

Модулі ідентифікації моделі об'єкта, аналізу та синтезу задачі керування, стикування зон у разі використання багатозонних моделей (режим «рекуперація»). Зі структурної схеми (рис. 1) видно функціональне призначення кожного модуля. Створений пакет програм є складником експертної системи (ЕС) «Енергозберігаюче керування динамічними об'єктами».

Структурна схема віддзеркалює такі функції: ідентифікацію моделі об'єкта на МСФ (отримання «багатозонної моделі»); розрахунок параметрів моделі об'єкта; розрахунок параметрів функцій керування під час використання програмної стратегії; перевірка виконання умов існування функцій керівних впливів для заданого масиву вихідних даних; визначення вигляду функції; розрахунок оптимальної траєкторії зміни фазових координат і значення функціоналу; формування алгоритмів синтезу оптимальної керівної дії в реальному часі.

Модуль ідентифікації дає змогу визначити модель динаміки досліджуваного об'єкта, зокрема й багатозонну, розрахувати чисельні значення параметрів диференційного рівняння, оцінити адекватність отриманої моделі.



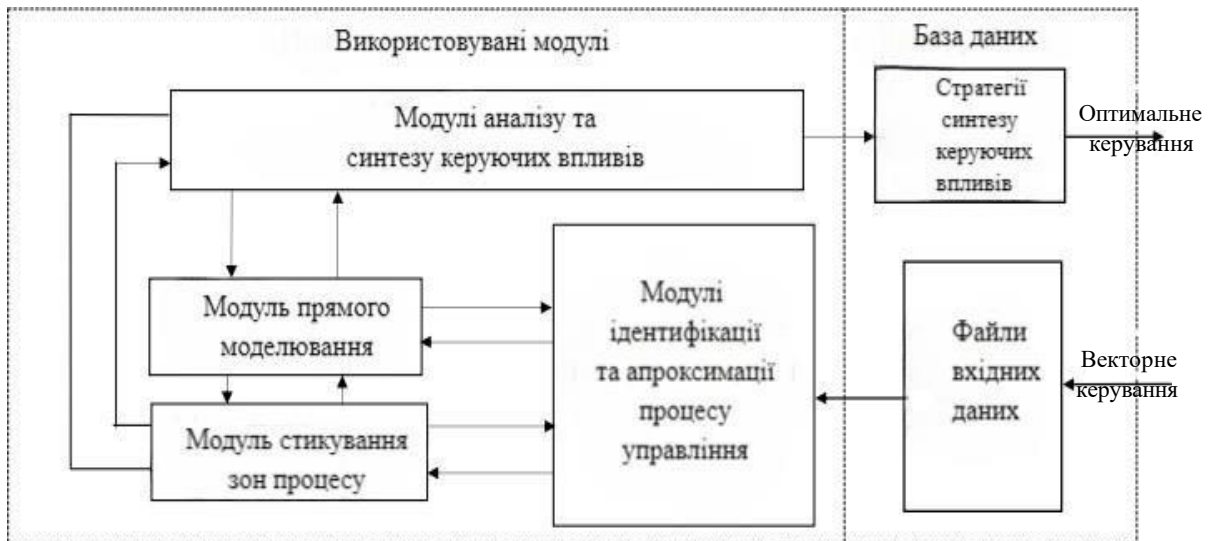


Рис. 1. Структурна схема взаємодії програмних модулів під час розв'язання задач аналізу та синтезу енерго- або ресурсозберігаючого керування для гібридної силової установки, що описуються багатозонними моделями (режим «рекуперація»)

У разі, якщо похибка перевищує допустиме значення, то можна описати динаміку кількома видами диференційних рівнянь (або диференційними рівняннями з різними значеннями параметрів), розбивши діапазон на необхідну кількість зон. Цей модуль, використовуючи методи апроксимації, виключення помилок і згладжування, пропонує вигляд моделі об'єкта управління на множині станів функціонування. Основна різниця з традиційним підходом полягає в тому, що нелінійна модель досліджуваного процесу є комбінацією частково-лінійних моделей із часовим включенням лінійних ділянок.

Для згладжування експериментальних показників використовують метод четвертих різниць, тобто параболічну апроксимацію кожних п'яти сусідніх значень. Далі параметри моделі обчислюються за формулами.

Модуль синтезу оптимальних програм слугує для отримання єдиної програми об'єкта, динаміка керованого процесу якого подана багатозонною моделлю. Він працює на підставі такої методики стикування елементів багатозонної моделі:

- задаються відомі масиви реквізитів кожної зони, передбачуваний час оптимального досліджуваного процесу об'єкта управління, межі управління, час неоптимального досліджуваного процесу й межі за умов неоптимального управління;
- задається час перемикання піддіапазонів фазових координат, інтервали пошуку оптимального часу перемикання й кількість зон;

- для кожної зони на кожному часовому інтервалі розраховується оптимальне управління, траєкторії зміни фазових координат і функціонал витрат;

- розраховуються суми функціоналів усіх зон і вони порівнюються;

- як оптимальну керовану програму обирають ту, де сума функціоналів витрат мінімальна;

- як оптимальний час перемикань піддіапазонів фазових координат обирають той, що дає мінімальну суму функціоналів витрат;

- якщо розрахована на заданому інтервалі економія є недостатньою, рекомендується збільшити час керування.

Цей модуль призначений для об'єднання оптимальних програм кожної зони моделі в єдину оптимально-керовану режимом «рекуперація» програму. В основі модуля лежать методи динамічного програмування й синтетичних змінних. Отримана оптимальна програма відпрацьовується з використанням модулів імітаційного моделювання, що містять пряме моделювання систем на множині станів функціонування, і якщо вона задовольняє задані вимоги, то результуючі дані перетворюють на файл, що містить оптимальні керівні впливи і який зберігають у базі даних.

Об'єктом керування в робочій версії ІКС ГСУ може бути будь-яке обладнання, що впливає на зниження енерговитрат у процесі виконання транспортної роботи. Для отримання необхідної інформації про стан ГСУ

пропонується в складі технічного забезпечення ІКС ГСУ використовувати контролери, що поряд із функціями керування виконують вимірвальні функції, тобто можуть здійснювати постійний моніторинг стану ГСУ керування.

### Висновки

Удосконалено методику керування режимами силової установки з огляду на зовнішні умови й вантажно-швидкісний режим гібридної силової установки.

Створено методологію побудови ІКС, що дає змогу в реальному масштабі часу синтезувати розв'язання задач керування режимами силової установки за якісними та енергетичними критеріями.

### Література

1. M. Nour et al., Review of Positive and Negative Impacts of Electric Vehicles Charging on Electric Power Systems. *Energies*. 13, 18(2020).
2. J. Fan et al., Map-Based Power-Split Strategy Design with Predictive Performance Optimization for Parallel Hybrid Electric Vehicles. *Energies*. 8, 9 (2015).
3. L. Qin et al., Adaptive Double Kalman Filter Method for Smoothing Wind Power in Multi-Type Energy Storage System. *Energies*. 16, 4 (2023).
4. R. Ravi et al., Battery Management Systems (BMS) for EV. *Electric Vehicles and the Future of Energy Efficient Transportation*. 35 (2021).
5. Y. Bai et al., Adaptive Optimization Operation of Electric Vehicle Energy Replenishment Stations Considering the Degradation of Energy Storage Batteries. *Energies*. 16, 13 (2023).
6. B. Hu et al., A Data-Driven Solution for Energy Management Strategy of Hybrid Electric Vehicles Based on Uncertainty-Aware Model-Based Offline Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 19, 6 (2023).
7. Q. Yang et al., A Bi-Level Optimization and Scheduling Strategy for Charging Stations Considering Battery Degradation. *Energies*. 16, 13 (2023).
8. Y. Cao et al., An Overview of Modelling and Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles. *Applied Sciences*. 13, 10 (2023).
9. D. Wang et al., Review of Energy-Saving Technologies for Electric Vehicles, from the Perspective of Driving Energy Management. *Sustainability*. 15, 9 (2023).
10. J. Hao et al., Model Predictive Control Based Energy Management Strategy of Series Hybrid Electric Vehicles Considering Driving Pattern Recognition. *Electronics*. 12, 6 (2023).
11. K. Borisoot et al., Optimal Energy Management for Virtual Power Plant Considering Operation and Degradation Costs of Energy Storage System and Generators. *Energies*. 16, 6 (2023).
12. B. Chen et al., Optimal Energy Management of Series Hybrid Electric Vehicles with Engine Start-Stop System. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 31, 2 (2023).
13. B. Han et al., Optimal Strategy for Comfort-Based Home Energy Management System Considering Impact of Battery Degradation Cost Model. *Mathematics*. 11, 6 (2023).
14. V.P. Sidharthan et al., Adaptive-Energy-Sharing-Based Energy Management Strategy of Hybrid Sources in Electric Vehicles. *Energies*. 16, 3 (2023).
15. Bazhinov, O.; Gerlici, J.; Kravchenko, O.; Haiek, Y.; Bazhynova, T.; Zaverukha, R.; Kravchenko, K. Development of a method for evaluating the technical condition of a car's hybrid powertrain. *Symmetry* 2021, 13, 2356.

**Бажинова Тетяна Олексіївна, к.т.н.,**

інженер-програміст,

АВЛ Ліст ТОВ, Шонауер штрассе 5, 4400 Штраер,

Австрія; e-mail: tatiana.bazhynova@avl.com,

тел: [+380982568850](tel:+380982568850);

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3003-4028>

### Features of the information and control system of the car's hybrid power plants

**Abstract. Problem.** Until now, a number of features of IBS power plants of electric and hybrid cars remain unexplored. The applied IUS analysis and synthesis methods do not pay enough attention to the multi-criteria nature of the arising optimization tasks. Management adaptation methods to changing external operating conditions are insufficiently effective. These circumstances do not allow to fully reveal the potential possibilities of IISD power plants of electric and hybrid cars. This determines the relevance of improvement and development of new methods of modeling and optimization of IUS control of power plants of electric and hybrid cars based on modern theory of automatic control, vector optimization, neural network and neuro-fuzzy adaptive methodology. A methodology for the construction of IUS invariant to various power plants of electric and hybrid cars has been developed for operational management of modes according to quality, energy and other criteria. **Results.** The mathematical support of the "Recovery" mode differs from classical problems of optimal control in that it allows changing the parameters of the control power plant, its model type, limit values for control influences, and phase coordinates. **Originality.** The core of the IICS GSU software is a knowledge base, in which procedural knowledge is presented in the form of frames that implement the algorithmic support of IICS GSU. The knowledge base has a stratified, hierarchical structure that reflects an integrated graph of the synthesis technology of the ZOU

solution. The content of the frames of the knowledge base ensures the search for a solution to the ZOU problem in the state space. Frames contain slots that hold not only specific data but also the names of procedures that process them according to a given algorithm. Some frames contain slots filled with product rules. During the creation of the knowledge base of the research prototype, work was carried out on the unification of frame names, which makes it possible to quickly build the knowledge bases of working prototypes. Knowledge frames are a set of classes developed in a visual programming environment. **Practical value.** The resulting optimal program is worked out using simulation modeling modules, which include direct modeling of systems in multiple states of operation, and if it satisfies the

specified requirements, the resulting data is converted into a file containing optimal control influences, which is stored in the database.

**Key words:** hybrid, power plant, method, system, movement, recuperation.

**Tetiana Bazhynova**, PhD, Software & Functions Engineer Commercial Vehicle SW& Control Systems Engineering And Technology Powertrain System AVL List GmbH, Schonauer Strasse 5, 4400 Steyr, Austria;

e-mail: tatiana.bazhynova@avl.com,

Contact phone: +380982568850;

ORCID number:

<https://orcid.org/0000-0003-3003-4028>

---