

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЗАВЕРУХА РУСЛАН РОМАНОВИЧ

УДК 629.113

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СИСТЕМ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ
ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ**

Спеціальність - 274 Автомобільний транспорт
Галузь знань – 27 «Транспорт»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Р.Р. Заверуха

Науковий керівник: **Бажинов Олексій Васильович**, доктор технічних наук,
професор

Харків – 2023

АНОТАЦІЯ

Заверуха Р.Р. Підвищення ефективності експлуатації функціональних систем силової установки гібридного автомобіля. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 274 – Автомобільний транспорт. – Харківський національний автомобільно-дорожній університет МОН України, Харків, 2023.

Дисертацію присвячено вирішенню актуального науково-практичного завдання підвищення ефективності експлуатації функціональних систем гібридного автомобіля шляхом оперативного синтезу управляючих впливів за енергетичними і якісними критеріями з урахуванням умов експлуатації.

Сучасний стан розвитку ринку і оновлення структури гібридних автомобілів, які експлуатуються в умовах України, зумовлюють необхідність комплексного підходу до оцінки їх технічного стану з метою вибору найкращої технології діагностування гібридної силової установки.

На підставі оцінки і проведеного аналізу результатів досліджень обґрунтовано принципи і метод діагностики технічного стану гібридної силової установки, що забезпечує єдиний підхід дослідження технічного стану агрегатів незалежно від схеми будови та конструктивних особливостей гібридного автомобіля. Більшість викладених технологій діагностування гібридних силових установок не дозволяють об'єктивно проводити комплексну оцінку їх технічного стану за діагностичними параметрами, оскільки не відпрацьовано механізм їх спільного нормування і приведення до єдиної шкали вимірювання.

Розроблено стратегію діагностування технічного стану гібридної силової установки на підставі концепції нейромережевого та нейро-нечіткого управління з адаптивним критиком на підставі методу навчання нейронної мережі з підкріпленням.

Виконана формальна постановка оптимізаційної задачі діагностування гібридної силової установки при векторному функціоналі якості управління.

Компонентами векторного функціоналу прийнято критерії точності управління, використання енергії тягової акумуляторної батареї, ступеня токсичності відпрацьованих газів. Надано використання принципу гарантованого результату та лінованого звернення векторного критерія в суперкритерій для визначення технічного стану гібридної силової установки на множині Парето-оптимальних управлінь при нерівних критеріях оптимальності. В основу синтезу математичної моделі діагностики технічного стану гібридної силової установки лежить апроксимація нейронними мережами характеристик ДВЗ, які базуються на діагностичних даних випробувань.

Розроблено теоретичні основи структурної та параметричної ідентифікації математичної моделі технічного стану гібридної силової установки. Отримана нейромережева модель діагностування технічного стану гібридної силової установки визначає залежність критерія показника ресурсу від енергетичних витрат автомобіля. Швидкість руху автомобіля, напруга і струм тягової акумуляторної батареї, час впорскування палива форсункою та швидкість обертання колінчастого валу ДВЗ є енергетичними показниками діагностування технічного стану гібридної силової установки.

Удосконалено оцінку технічного стану ДВЗ гібридної силової установки за діагностичними параметрами економічності та екологічної безпеки на підставі використання апарату штучних нейронних мереж. Встановлено особливість діагностики технічного стану ДВЗ гібридної силової установки, яка відображає швидкісні характеристики ДВЗ і показники його економічності та токсичності відпрацьованих газів.

Визначено стійку і ефективну роботу тягового електродвигуна гібридної силової установки у всьому діапазоні тягово-швидкісних режимів, що задаються за умовами обмеження споживаної потужності тягової акумуляторної батареї. Розроблено математичні моделі складових гібридної силової установки, як ДВЗ, тягового електродвигуна та тягової акумуляторної батареї.

Експериментально підтверджено ефективність використання енергетичного підходу для діагностування технічного стану гібридної силової установки та

науково обґрунтовано діагностичні параметри ДВЗ і тягової акумуляторної батареї на підставі розрахункового експерименту та дорожніх випробувань гібридного автомобіля. Розроблено лабораторний стенд для визначення характеристик подачі палива та електричних параметрів електромагнітних форсунок розподіленої системи впорскування ДВЗ гібридного автомобіля. В основі стенда використано елементи електронних систем керування роботою ДВЗ систему впорскування Multec-S. За результатами стендових досліджень встановлено значну розбіжність (близько 50 %) у подачі палива окремими форсунками на усіх режимах роботи.

Отримано метод діагностики технічного стану гібридної силової установки, який використовує штучні нейронні мережі та системи нечіткого висновку для ідентифікації коефіцієнта технічного стану ДВЗ та тягової акумуляторної батареї. Встановлено, що при використанні штучної нейронної мережі найкращі характеристики забезпечує трьохслойна мережа прямого розповсюдження, в першому скритому слої знаходиться 10 нейронів з сигмоїдальними активаційними функціями, а в другому – 4 нейрона.

Навчання штучної нейронної мережі виконувалося на навчальній виборці з використанням навчальної множини. Контрольна підмножина використовувалася для контролю похибки навчання. В результаті налагоджування системи розкид точок експериментальних і розрахункових зменшився, що підтверджує якість налагоджування тестуємої нечіткої моделі. В результаті навчання штучної нейромережі середньоквадратичне відхилення похибки на контрольній виборці склало $0,012 K_p$ (5,4 %).

Практичне значення отриманих результатів дослідження полягає в тому, що отримані наукові результати становлять єдиний комплекс досліджень (концепція, принципи, методи та математичні моделі), запропоновано методику діагностування технічного стану гібридної силової установки на підставі концепції нейромережевого управління. Дисертаційні дослідження складають теоретичну базу для діагностики технічного стану агрегатів гібридної силової установки, наукового обґрунтування базових діагностичних параметрів екологічно-чистих транспортних засобів.

Отримані результати були використані при розробці метода діагностування технічного стану складових гібридної силової установки за допомогою обчислювального експерименту і визначені науково обґрунтовані рекомендації встановлення діагностичних параметрів для аналізу технічного стану ДВЗ та тягової акумуляторної батареї.

За результатами досліджень запропоновано алгоритм та процедуру раціонального діагностування технічного стану гібридної силової установки автомобіля на етапі експлуатації. Розроблені методики впроваджені в ТОВ «ТЕРКО АВТО», а також використовуються в навчальному процесі Тернопільського фахового коледжа Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Ключові слова: гібридна силова установка, технічний стан, автомобіль, діагностика, тягова батарея; модель нейронної мережі; нечітка модель.

Список публікацій здобувача

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Марціяш О.М., Мурований І.С., Заверуха Р.Р. Визначення характеристик роботи електромагнітних форсунок бензинового двигуна на лабораторному стенді. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки», Луцьк, 2016, вип. 55.

С.237-240. <http://irbis-nbuv.gov.ua>cgiirbis> 64. (фахове видання).

2. Марціяш О.М., Заверуха Р.Р., Ужва А.В. Аналіз моделей стендів для дослідження параметрів системи керування бензинових ДВЗ легкових автомобілів. Автомобільний транспорт, вип. 41, 2017. С. 61 -

66. http://nbuv.gov.ua/UJRN/at_2017_41_11. (фахове видання).

3. Бажинов О.В., Бажинова Т.О., Заверуха Р.Р. Інформаційна комплексна система діагностики гібридних і електромобілів. *Інженерія природокористування*. Харків, 2020, №2 (16), с.12-18. ISSN 2311-1828, [https://doi.org/10.37700/enm.2020.2\(16\).12 - 18](https://doi.org/10.37700/enm.2020.2(16).12-18)

<http://dspace.khntusg.com.ua/bitstream/123456789/13508/1/4.pdf> (фахове видання).

4. Бажинов О.В., Заверуха Р.Р. Діагностика функціональних систем силової установки гібридного автомобіля. *Технічний сервіс агропромислового, лісового*

та транспортного комплексів, Харків, ХНУСГ, 2020, № 21, с.195-200.

<https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/2988/1/195-200.pdf>, DOI

10.37700/ts.2020.21.195-200. (фахове видання)

5. Бажинов О.В., Бажинова Т.О., Заверуха Р.Р. Метод визначення ефективної роботи силової установки гібридного автомобіля. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*, Харків, ХНУСГ,

2021, № 23, с.180-187. [https://repo-btu-kharkov-](https://repo-btu-kharkov-ua.translate.goog/handle/123456789/1329?_x_tr_sl=uk&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc)

[ua.translate.goog/handle/123456789/1329?_x_tr_sl=uk&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc](https://repo-btu-kharkov-ua.translate.goog/handle/123456789/1329?_x_tr_sl=uk&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc)

https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/1329/1/ZHurnal_TSALTK_23_2021_177_184.pdf. (фахове видання).

6. Бажинов О.В. Діагностика силової установки гібридного автомобіля/

Бажинов О.В., Бажинова Т.О., Заверуха Р.Р. – *Монографія*, Харків: ХНАДУ, 2021.-116с. ISBN 978-966-303-779-0.

https://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/bitstream/123456789/5342/1/Monografiya_Bazhynov_%20Zaverucha_21.pdf. (

7. Development of a Method for Evaluating the Technical Condition of a Cars Hybrid Powertrain by Oleksiy Bazhinov, Juraj Gerlici, Oleksandr Kravchenko, Yevhen Haiek, Tetiana Bazhynova, Ruslan Zaverukha and Kateryna Kravchenko. *Symmetry* 2021, 13(12). 2356, <https://doi.org/10.3390/sym13122356> Viewed by 393. (Scopus).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Ляшук О.П., Пиндус Ю.І., Заверуха Р.Р., Пиндус Т.Б. Стенд дослідження робочих параметрів системи керування бензинових двигунів. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*, Т.1, м. Тернопіль, Тернопіль, 2015. С. <http://tntu.edu.ua/>

9. Бажинов А.В., Заверуха Р.Р. Применение систем нечеткого вывода для оценки технического состояния гибридной силовой установки автомобиля. *Збірник тез доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції «*

Автомобільний транспорт та інфраструктура», м. Київ 23-25 квітня 2020, Київ, 2020. С. 8-10.

https://nubip.edu.ua › zbirnik_tez_ati_2020_0

10. Бажинов О.В., Заверуха Р.Р. Вибір стратегії управління силовою установкою гібридного автомобіля. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції « Концепція розвитку електричного транспорту та його систем»*, м. Харків 7-9 квітня 2020, Харків, 2020. С. 31-32.

<https://science.kname.edu.ua › dok › 2020konf>

11. Бажинов О.В., Заверуха Р.Р. Критерії оцінки технічного стану силової установки гібридного автомобіля. *Матеріали науково-практичної конференції «Службово-бойова діяльність Національної гвардії України: сучасний стан, проблеми і перспективи»*, м. Харків 2 квітня 2020. Харків 2020. С. 112-114.

Nangu.ua http://nangu.edu.ua<tez%202020_sekcia%204.

12. Заверуха Р.Р. Використання інформаційних систем в управлінні гібридними силовими установками автомобілів. *Збірник наукових праць П Міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерні технології і мехатроніка»*, Харків, 28 травня 2020, Харків, 2020. С. 347-350.

<https://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/bitstream/123456789/3607/1/347-350.pdf>.

13. Заверуха Р.Р. Обґрунтування режимів роботи гібридної силової установки автомобіля. *Матеріали МНПК «Молодь і технічний прогрес в АПВ» Інноваційні розробки в аграрній сфері*, Том 2, Харків, 7-8 травня 2020, Харків, 2020. С. 64-65. www.master2014.metalcontrol.com.ua.

14. Бажинов О.В., Заверуха Р.Р. Математична модель тягової акумуляторної батареї гібридного автомобіля. *Збірник тез доповідей IV МНПК «Автомобільний транспорт та інфраструктура»* 21-23 квітня 2021, Київ, с.

89-90. <https://dspace2.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/267>

Наукові праці, які додатково відображують наукові результати дисертації:

15. Заверуха Р.Р., Марціяш О. М., Пиндус Ю. І., Ляшук О. Л., Клендій В.М.

Патент України на корисну модель № 115354 Лабораторний стенд для визначення характеристик роботи електромагнітних форсунок бензинового

двигуна легкового автомобіля: МПК G 01F 5/00. № у 2016 11488, заявл.

06.12.2016; опубл. 10.04.2017, Бюл. № 7.

16. Заверуха Р.Р., Марціяш О.М., Калушка В.П., Клендій В.М. Патент України на корисну модель №128362 Лабораторний стенд для визначення робочих характеристик системи впрыскування палива легкового автомобіля: МПК G09B 25/02. № у 2018 04380, заявл. 20.04.2018; опубл. 10.09.2018, Бюл. № 17.
17. Заверуха Р.Р., Марціяш О.М., Калушка В.П., Клендій В.М. Патент України на корисну модель №128366 Лабораторний стенд для визначення робочих характеристик безконтактної системи запалювання легкового автомобіля: МПК G 09B 25/02. № у 2018 04397, заявл. 20.04.2018; опубл. 10.09.2018, Бюл. №17.
18. Заверуха Р.Р., Марціяш О.М., Калушка В.П., Клендій В.М. Патент України на корисну модель № 123583 Лабораторний стенд для визначення робочих характеристик системи електропостачання легкового автомобіля: МПК G 09B 25/02. № у 2017 11117, заявл. 13.11.2017; опубл. 26.02.2018, Бюл. №4.

ANNOTATION

Zaverukha R.R. Increasing the efficiency of the operation of the functional systems of the power plant of the hybrid car. - Qualifying research paper with manuscript rights.

Dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in specialty of 274 – Motor transport. – Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, 2023.

The dissertation is dedicated to the solution of the actual scientific and practical task of increasing the efficiency of operation of functional systems of a hybrid car by means of operational synthesis of control effects according to energy and quality criteria, taking into account operating conditions.

The current state of market development and renewal of the structure of hybrid vehicles that are operated in the conditions of Ukraine necessitate an integrated approach to assessing their technical condition in order to select the best hybrid power plant diagnostic technology.

Based on the assessments, an analysis of the results of the study was carried out, substantiating the principles and methods for diagnosing the technical machine of a hybrid power plant, which are protected by a single review of the technical machine of the units independently in the schemes of the structure and design features of the hybrid one. Most of the advanced technologies for diagnosing hybrid power plants do not allow to objectively carry out a comprehensive assessment of their technical state for diagnostic parameters, but the mechanisms of their sleep normalization and reduction to a single scale of metering are not practiced.

A strategy for diagnosing the technical condition of a hybrid power plant has been developed based on the concept of neural network and neurofuzzy control with an adaptive critic based on the method of training a neural network with support.

The formal formulation of the optimization problem of diagnosing a hybrid power plant with the vector functionality of control quality has been completed. The criteria of control accuracy, the use of traction battery energy, and the degree of toxicity of exhaust gases are adopted as components of the vector functional. The use of the guaranteed result principle and the linear transformation of the vector criterion into a supercriterion for determining the technical condition of a hybrid power plant on a set of Pareto-optimal controls with unequal optimality criteria is presented. The basis of the synthesis of the mathematical model for diagnosing the technical condition of the hybrid power plant is the approximation of the characteristics of the internal combustion engine by neural networks, which are based on the diagnostic test data.

The theoretical foundations of the structural and parametric identification of the mathematical model of the technical state of the hybrid power plant have been developed. The obtained neural network model for diagnosing the technical condition of the hybrid power plant determines the dependence of the criterion of the resource indicator on the energy consumption of the car. The speed of the car, the voltage and current of the traction battery, the time of fuel injection by the nozzle and the speed of rotation of the crankshaft of the internal combustion engine are energy indicators for diagnosing the technical condition of the hybrid power plant.

The assessment of the technical condition of the internal combustion engine of the hybrid power plant has been improved according to the diagnostic parameters of economy and environmental safety based on the use of artificial neural networks. A feature of diagnostics of the technical condition of the diesel engine of the hybrid power plant has been established, which reflects the speed characteristics of the diesel engine and indicators of its economy and toxicity of exhaust gases.

The stable and effective operation of the traction electric motor of the hybrid power plant in the entire range of traction-speed regimes, set by the conditions for limiting the power consumption of the traction battery, is determined. Mathematical models of the components of the hybrid power plant, such as internal combustion engine, traction electric motor and traction battery, have been developed.

The effectiveness of the use of the energy approach for diagnosing the technical condition of the hybrid power plant was experimentally confirmed, and the diagnostic parameters of the internal combustion engine and the traction battery were scientifically substantiated based on the calculation experiment and road tests of the hybrid car. A laboratory stand was developed to determine the fuel supply characteristics and electrical parameters of the electromagnetic injectors of the distributed internal combustion engine injection system of a hybrid car. At the base of the stand, elements of electronic systems for controlling the operation of the internal combustion engine and the injection system were used Multec- S. The results of the bench tests established a significant discrepancy (about 50%) in the fuel supply by individual injectors in all operating modes.

A method for diagnosing the technical condition of a hybrid power plant has been obtained, which uses artificial neural networks and fuzzy inference systems to identify the technical condition coefficient of the internal combustion engine and the traction battery. It was found that when using an artificial neural network, the best characteristics are provided by a three-layer forward propagation network, in the first hidden layer there are 10 neurons with sigmoidal activation functions, and in the second - 4 neurons.

The artificial neural network training was performed on a training sample using a training set. The control subset was used to control for learning error. As a result of

setting up the system, the spread of experimental and calculated points decreased, which confirms the quality of setting up the test fuzzy model. As a result of the training of the artificial neural network, the mean square deviation of the error on the control sample was 0,012 K_p (5,4 %).

The practical significance of the obtained results is that the obtained scientific results constitute a single complex of research (concept, principles, methods and mathematical models), a technique for diagnosing the technical condition of the hybrid power plant is proposed based on the concept of neural network control. Dissertation studies form the theoretical basis for diagnosing the technical condition of hybrid power plant units, scientific substantiation of the basic diagnostic parameters of environmentally friendly vehicles. The obtained results were used in the development of a method for diagnosing the technical condition of the components of the hybrid power plant using a computational experiment, and scientifically based recommendations for setting diagnostic parameters for the analysis of the technical condition of the internal combustion engine and the traction battery were determined.

Based on the results of the research, an algorithm and procedure for rational diagnosis of the technical condition of the car's hybrid power plant at the operational stage are proposed. The developed methods are implemented. The developed methods are implemented TOV «TERKO AVTO», and they are also used in the educational process of the Technical College of the Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu.

Keywords: hybrid power plant, technical condition, car, diagnostics, traction battery; neural network model; fuzzy model.

List of publications of the acquirer:

List of publications in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Martsysh O.M., Murovaniy I.S., Zaverukha R.R. Determining the performance characteristics of electromagnetic nozzles of a gasoline engine on a laboratory stand.

Interuniversity collection "Scientific notes", Lutsk, 2016, issue 55. P. 237-240.
<http://irbis-nbuv.gov.ua>cgiirbis> 64.

2. Martsiash O.M., Zaverukha R.R., Uzhva A.V. Analysis of stand models for researching parameters of the control system of gasoline internal combustion engines of passenger cars. *Motor transport*, vol. 41, 2017. P. 61-66.
 . http://nbuv.gov.ua/UJRN/at_2017_41_11

3. Bazhinov O.V., Bazhinova T.O., Zaverukha R.R. Information complex system of diagnostics of hybrid and electric cars. *Nature management engineering. Kharkiv*, 2020, No. 2 (16), pp. 12-18 [https://doi.org/10.37700/enm.2020.2\(16\).12](https://doi.org/10.37700/enm.2020.2(16).12) – 18.
<http://dspace.khntusg.com.ua/bitstream/123456789/13508/1/4.pdf>.

4. Bazhinov O.V., Zaverukha R.R. Diagnostics of functional systems of the power plant of a hybrid car. *Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes, Kharkiv, KhNUSG*, 2020, No. 21, p. 195-200. https://repo-btu-kharkova.translate.goog/handle/123456789/2988?_x_tr_sl=uk&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc <https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/2988/1/195-200.pdf>

5. Bazhinov O.V., Bazhinova T.O., Zaverukha R.R. The method of determining the effective operation of the power plant of a hybrid car. *Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes, Kharkiv, KhNUSG*, 2021, No. 23, p. 180-187. https://repo-btu-kharkov-a.translate.goog/handle/123456789/1329?_x_tr_sl=uk&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc

https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/1329/1/ZHurnal_TSALTK_23_2021_177_184.pdf

6. Bazhinov O.V. Diagnostics of the power plant of a hybrid car/ Bazhinov O.V., Bazhinova T.O., Zaverukha R.R. - *Monograph, Kharkiv: Khnadu*, 2021. - 116 p. ISBN 978-966-303-779-0.

https://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/bitstream/123456789/5342/1/Monografiya_Bazhinov_%20Zaverucha_21.pdf.

7. Development of a Method for Evaluating the Technical Condition of a Cars Hybrid Powertrain by Oleksiy Bazhinov, Juraj Gerlici, Oleksandr Kravchenko, Yevhen Haiek, Tetiana Bazhynova, Ruslan Zaverukha and Kateryna Kravchenko. *Symmetry* 2021, 13 (12). 2356, <https://doi.org/10.3390/sym13122356>-07 Dec 2021 Viewed by 393.

The works confirming approbation of materials of the dissertation:

8. Lyashuk O.P., Pindus Yu.I., Zaverukha R.R., Pindus T.B. Stand for the study of operating parameters of the control system of gasoline engines. *Collection of abstracts of reports of the international scientific and technical conference of young scientists and students "Actual problems of modern technologies", Volume 1, Ternopil 25-26 November 2015*, Ternopil 2015. P.258-259. <http://tntu.edu.ua/>.
9. Bazhinov A.V., Zaverukha R.R. Application of fuzzy inference systems to assess the technical condition of a hybrid power plant of a car. *Collection of abstracts of reports of the International Scientific and Practical Conference "Automotive Transport and Infrastructure", Kyiv 23-25 April 2020*, Kyiv 2020. P. 8-10. https://nubip.edu.ua/zbirnik_tez_ati_2020_0.
10. Bazhinov O.V., Zaverukha R.R. Choosing a strategy for managing the power plant of a hybrid car. *Materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference "Concept of development of electric transport and its systems", Kharkiv 7-9 April 2020*, Kharkiv, 2020. P. 31-32. <https://science.kname.edu.ua/dok/2020konf>.
11. Bazhinov O.V., Zaverukha R.R. Criteria for assessing the technical condition of the power plant of a hybrid car. *Materials of the scientific and practical conference "Service and combat activity of the National Guard of Ukraine: current state, problems and prospects", Kharkiv 2 April 2020*, Kharkiv, 2020. P. 112-114. <http://nangu.edu.ua/tez%202020sekcia%204>.
12. Zaverukha R.R. The use of information systems in the management of hybrid power plants of cars. *Collection of scientific works P of the International Scientific and Practical Conference "Computer Technologies and Mechatronics", Kharkiv 28*

May2020,*Kharkiv*,2020.P.347-350.

<https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/dSPACE/bitstream/123456789/3607/1/347-350.pdf>.

13. Zaverukha R.R. Justification of the operation modes of the hybrid power plant of the car. *Materials of MNPC "Youth and technical progress in APV" Innovative developments in the agricultural sphere, Volume 2, Kharkiv, May 7-8 2020, P. 64-65.*
 . www.master2014.metalcontrol.com.ua.

14. Bazhinov O.V., Zaverukha R.R. *Mathematical model of the traction battery of a hybrid car. Collection of abstracts of reports of IV MNPC "Automotive transport and infrastructure"* Kyiv April 21-23, 2021, Kyiv, p. 89-90.
<https://dSPACE2.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/267>

Proceedings that additionally reflect the scientific results of the dissertation:

15. Zaverukha R.R., Marzijach O.M., Pindus J.I., Lyachuk O.L., Klendiy V.M. Laboratory stand for determining the performance characteristics of electromagnetic injectors of a gasoline engine of a passenger car: pat. 115354U of Ukraine: IPC G 01F 5/00. No. u 2016 11488, application 06.12.2016; published 10.04.2017, Bul. No. 7.

16. Zaverukha R.R., Marzijach O.M., Kaluchka V.P., Klendij V.M. Laboratory stand for determining the operating characteristics of the fuel injection system of a passenger car: pat. 128362 U of Ukraine: IPC G09B 25/02. No. u 2018 04380, application 20.04.2018; published 10.09.2018, Bul. No. 17.

17. Zaverukha R.R., Marzijach O.M., Kaluchka V.P., Klendij V.M. Laboratory stand for determining the operating characteristics of the non-contact ignition system of a passenger car: pat. 128366 U of Ukraine: IPC G 09B 25/02. No. u 2018 04397, application 20.04.2018; published 10.09.2018, Bul. No. 17.

18. Zaverukha R.R., Marzijach O.M., Kaluchka V.P., Klendij V.M. Laboratory stand for determining the operating characteristics of the power supply system of a passenger car: pat. 123583 U of Ukraine: IPC G 09B 25/02. No. u 2017 11117, application 11/13/2017; published 26.02.2018, Bul. No. 4.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ І ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	24
1.1. Гібридні автомобілі як об'єкт оптимального управління.....	24
1.2. Зміни технічного стану силових установок гібридних автомобілів від зовнішніх умов.....	33
1.3. Використання інформаційних систем оцінки технічного стану силових установок гібридних автомобілів.....	37
1.4. Висновки за розділом, постановка мети та завдань дослідження	41
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ.....	43
2.1. Вихідні положення	43
2.2. Критерії оцінки технічного стану гібридної силовой установки	45
2.3. Схема гібридної силовой установки.....	50
2.4. Математичне моделювання гібридної силовой установки.....	56
2.5. Нейромережева модель оцінки технічного стану гібридної силовой установки.....	73
2.6. Висновки за розділом.....	83
РОЗДІЛ 3. Експериментальні дослідження технічного стану гібридної силовой установки.....	85
3.1. Методика та апаратура експериментальних досліджень.....	85
3.2. Результати дослідження зміни технічного стану силовой установки.....	95
3.3. Висновки за розділом.....	104
РОЗДІЛ 4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	105

4.1. Приклади ефективного діагностування гібридної силовс	
установки.....	105
4.2. Використання систем нечіткого висновку та штучних нейронних мереж	
для оцінки технічного стану гібридної силової установки.....	113
4.3. Висновки за розділом	122
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	124
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	126
ДОДАТКИ.....	138

ВСТУП

За останні роки значно збільшилось кількість автомобілів з гібридними силовими установками, які в якості первинного джерела використовують двигун внутрішнього згоряння, а другим є електричний накопичувач енергії що має спряження з електромеханічною системою приводу ведучих коліс.

В гібридних автомобілях передача енергії від двигуна внутрішнього згоряння на ведучі колеса автомобіля реалізується за одною із схем: послідовна, паралельна або змішана. Окремі автовиробники розділяють гібриди на «м'які» (mild hybrids), де допоміжне джерело енергії набуває чинності як асистент, «повний» (full hybrids), який може рухатися тільки на допоміжному джерелі енергії, і «підзарядкою» (plug-in hybrids).

Актуальність теми. Діагностування, ремонт автомобілів з гібридними силовими установками (ГСУ) є проблемою. ГСУ в сокупності з електронними блоками управління та іншими вузлами мають складну систему, яка потребує спеціальних підходів при визначенні технічного стану та ремонті. Така проблема виникає при експлуатації гібридних автомобілів. Крім того, від технічного стану автомобіля залежить і безпека дорожнього руху.

Технічний регламент не має інформації по визначенню технічного стану гібридного автомобіля. При проектуванні станцій технічного обслуговування та організації проведення ремонтних робіт використовується нормативно-довідкова література, але відсутня можливість використовувати цю літературу до автомобілів з гібридною силовою установкою бо потрібні інші методи проведення робіт.

Автовиробники гібридних автомобілів на даний момент не дуже заінтересовані в організації якісного обслуговування та надання інформації за умовами визначення технічного стану і нормативних параметрів силової гібридної установки. Обслуговуючий персонал станцій технічного обслуговування не має достатньої кваліфікації по проведенню діагностичних та ремонтних робіт гібридних автомобілів.

Збільшення виробництва гібридних автомобілів обумовлено підвищеними вимогами міжнародних стандартів до екологічної безпеки та економічної витрати енергії транспортних засобів. В той же час в залежності від умов експлуатації витрати палива та викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах не завжди відповідають даним автовиробників. В зв'язку з цим оцінка технічного стану гібридної силової установки транспортних засобів є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі технічної експлуатації та сервісу автомобілів імені М.Я. Говорущенка Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Робота виконана відповідно Закону України № 3715-VI від 08.09.2011р. «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», Розпорядженню від 30.05.2018р. № 430-р м. Київ « Про схвалення національної транспортної стратегії України на період до 2030 р.» і є складовою частиною науково-дослідної роботи кафедри технічної експлуатації та сервісу автомобілів імені М.Я. Говорущенка.

Наукові положення, розробки, висновки і рекомендації сформульовані в дисертації, використані при виконанні держбюджетної роботи Міністерства освіти і науки України « Розробка енергоефективного машинного комплексу для транспортного забезпечення Збройних Сил та Національної Гвардії України». (2021-2022рр. № 08-53-21 державної реєстрації № 0121u109610).

Мета дослідження: Метою роботи є підвищення ефективності експлуатації функціональних систем гібридного автомобіля шляхом оперативного синтезу управляючих впливів за енергетичними і якісними критеріями з урахуванням зовнішніх умов експлуатації.

Завдання дослідження: наукове обґрунтування проведення досліджень по розробці нового методу діагностики технічного стану ГСУ на підставі системного аналізу задачі підвищення екологічної чистоти і економічності транспортного засобу;

- розробка теоретичних основ структурної і параметричної ідентифікації математичної моделі технічного стану агрегатів ГСУ;
- розробка метода оцінки технічного стану ГСУ з урахуванням зовнішніх умов експлуатації;
- проведення експериментальних досліджень для оцінки ефективності розробленого методу діагностики технічного стану ГСУ;
- дослідження ефективності використання метода оцінки технічного стану ГСУ з метою наукового обґрунтування діагностичних параметрів.

Об'єкт дослідження: процес визначення робочих характеристик функціональних систем гібридної силової установки автомобіля.

Предмет дослідження: методи визначення ефективної роботоздатності гібридної силової установки на етапі експлуатації.

Методи дослідження: вирішення поставленої задачі забезпечується використанням системного підходу та раціонального поєднання теоретичних і експериментальних досліджень, узагальнення та аналізу відомих наукових результатів, а також використання математичного моделювання, математичної статистики, вперше розроблених спеціальних методик.

Експериментальні дослідження реалізовано з використанням діагностично-вимірювального комплексу, адаптованого для оцінювання технічного стану функціональних систем гібридної силової установки транспортного засобу. Для визначення ефективної роботоздатності функціональних систем гібридної силової установки застосовано методи натурних випробувань.

Наукова новизна одержаних результатів: у дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-прикладне завдання, що створює умови для ефективного використання гібридних автомобілів за рахунок удосконалення методу визначення ефективної роботоздатності гібридної силової установки на етапі експлуатації.

Вперше:- метод діагностики технічного стану ГСУ забезпечує єдиний підхід дослідження технічного стану агрегатів незалежно від схеми будови та конструктивних особливостей гібридного автомобіля;

- стратегія діагностування технічного стану ГСУ на підставі концепції нейромережевого та нейро-нечіткого управління з адаптивним критиком на підставі метода навчання нейронної мережі з підкріпленням.

отримали подальший розвиток: метод діагностування технічного стану ГСУ, який на відміну відомих, враховує наукове обґрунтування діагностичних параметрів на підставі проведених обчислювальних експериментів при використанні розроблених математичних моделей та дорожніх випробувань гібридного автомобіля.

Удосконалено: оцінку технічного стану двигуна внутрішнього згоряння ГСУ за діагностичними параметрами економічності та екологічної безпеки на підставі використання апарату штучних нейронних мереж;

Практичне значення одержаних результатів. полягає в тому, що отримані наукові результати становлять єдиний комплекс досліджень (концепція, принципи, критерії, методи та математичні моделі), запропоновано методику діагностування технічного стану ГСУ на підставі концепції нейромережевого управління. Дисертаційні дослідження складають теоретичну базу для діагностики технічного стану агрегатів ГСУ, наукового обґрунтування базових діагностичних параметрів екологічно-чистих транспортних засобів.

Отримані результати були використані при розробці метода діагностування технічного стану складових ГСУ за допомогою обчислювального експерименту і визначені науково обґрунтовані рекомендації встановлення діагностичних параметрів для аналізу технічного стану ДВЗ та ТАБ.

За результатами досліджень запропоновано алгоритм та процедуру раціонального діагностування технічного стану ГСУ автомобіля на етапі експлуатації. Розроблені методики впроваджені ТОВ «ТЕРКО АВТО», а також використовуються в навчальному процесі Технічному коледжі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: підвищення

ефективності експлуатації функціональних систем гібридної силової установки на підставі конструктивних особливостей ГСУ, яка використовує нейромережеву апроксимацію характеристики діагностичних параметрів [3,4,13]; теоретичні основи структурної та параметричної ідентифікації математичної моделі технічного стану ГСУ [6,15,18]; теоретичні основи структурної та параметричної ідентифікації математичної моделі технічного стану ГСУ [8,11,14]; отримано нейромережеву модель діагностування технічного стану ГСУ, яка визначає залежність критерія показника ресурсу від енергетичних витрат автомобіля [1, 5,10,17]; розроблено метод діагностики технічного стану ГСУ, який використовує штучні нейронні мережі та системи нечіткого висновку для ідентифікації коефіцієнта технічного стану ДВЗ та тягової акумуляторної батареї [7,9,16]; в результаті налагоджування системи розкид точок експериментальних і розрахункових зменшився, що підтверджує якість налагоджування тестованої нечіткої моделі [2,18].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати теоретичних та експериментальних досліджень доповідалися, обговорювалися і отримали позитивну оцінку на наступних міжнародних науково-технічних конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, Україна, ТНТУ ім. Івана Пулюя, 25-26 листопада 2015 року, форма участі – очна); Науково практична конференція «Службово-бойова діяльність Національної гвардії України: сучасний стан, проблеми та перспективи», (м. Харків, Україна, НАНГ, 02 квітня 2020 року, форма участі – очна); Всеукраїнська науково-практична конференція «Концепція розвитку електричного транспорту та його систем», (м. Харків, Україна, ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 07 квітня 2020 року, форма участі – очна). - III Міжнародна науково-практична конференція «Автомобільний транспорт та інфраструктура», (м. Київ, Україна, 2020 року, форма участі – очна).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 18 наукових працях, у тому числі: 5 статей у фахових виданнях України і 1 - у

закордонному виданні, що індексується міжнародною наукометричною базою Scopus, 1 монографія; 7 - матеріали конференцій. Отримано 4 патента.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів і висновків, списку використаних джерел і додатків на 28 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 165 сторінок, містить 41 рисунок, 8 таблиць. Список використаних джерел нараховує 99 найменувань на 11 сторінках.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ І ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Гібридні автомобілі, як об'єкт оптимального управління

Особливості силових установок гібридних та електромобілів дозволяють зробити висновок, що силові установки як об'єкт управління характеризуються зміною структурою, значною не лінійністю основних своїх елементів та параметричною невизначеністю. Ефективність використання силової установки визначається характеристиками її системи автоматичного управління, яка вирішує наступні задачі: ідентифікація поточного стану систем та вузлів силової установки, прогнозування тягово-швидкісного режиму руху; вибір оптимального режиму роботи силової установки в залежності від її технічного стану та режиму руху автомобіля; оптимальний розподіл потоків потужності між агрегатами силової установки на заданому тягово-швидкісному режимі; управління рекуперацією енергії гальмування, підзарядкою та витратою енергії накопичувача; стабілізація заданих режимів роботи окремих агрегатів силової установки; забезпечення інтерфейсу водія, імітуючи керування базовим автомобілем.

Задачі, які вирішуються системою автоматичного регулювання (САР) силовою установкою, мають ієрархічну організацію.

Першому рівню ієрархії відповідають задачі стабілізації заданих режимів роботи окремих агрегатів силової установки, а також забезпечення якості перехідних процесів. Закони регулювання характеризуються достатньо наближено до зміни параметрів об'єктів регулювання або мати можливість адаптації. Рішення даних задач полягає на локальні регулятори агрегатів силової установки (ДВЗ, регулятор тягового електроприводу, блок управління зарядом-розрядом тягової акумуляторної батареї (ТАБ)).

До другого рівня ієрархії відносяться задачі вибору оптимальних режимів роботи та особливості взаємодії підсистем і агрегатів силової установки,

перерозподіл потоків потужності між агрегатами в залежності від стану ТАБ, режиму руху автомобіля, керуючих та збурюючих (зовнішніх) впливів. При цьому забезпечується економічний та екологічно безпечний режим роботи ДВЗ, а також достатній запас енергії в накопичувачі для зниження пікового навантаження за рахунок допоміжного двигуна. Підзарядка ТАБ виконується при лишку потужності ДВЗ в гібридній силовій установці або шляхом рекуперації енергії гальмування автомобіля.

До третього рівня ієрархії відносять задачу забезпечення інтерфейсу водієві, імітуючи управління базовим автомобілем, а також забезпечує відображення поточного стану і режиму роботи силової установки. Дана задача має відношення

до силової установки гібридного та електромобіля, оскільки керування автомобілем виконується по концепції drive-by-wire, відповідно якої водій керує бортовим комп'ютером, не силовою установкою. Таке рішення не впливає на ефективність функціонування силової установки.

Задачі другого рівня ієрархії визначають стратегію управління гібридною силовою установкою, яка характерна тільки для гібридних та електромобілів з бортовою підзарядкою, коли об'єктами управління є декілька джерел потужності. Ефективність гібридного або електромобіля з бортовою підзарядкою залежить від обраного режиму роботи силової установки до тягово-швидкісного режиму, а також від якості управління перерозподілом потоків потужності між агрегатами силової установки. Цільова функція такого управління є мінімізація витрати палива та викидів шкідливих компонентів у відпрацьованих газів ДВЗ у межах потребам керованості, надійності, запасу енергії ТАБ та інше [21, 32]. Оптимальний розподіл потужності між ДВЗ і електродвигуна виконується на підставі аналізу статистичних карт питомої витрати палива гібридної силової установки. Оптимізація перерозподілу потоків потужності актуальна для гібридних автомобілів з паралельною та послідовно-паралельною схемами будови силової установки.

Задачі другого рівня ієрархії дозволяють постановку в загальному вигляді та не потребують конкретизації принципового функціонування допоміжного двигуна і контуру рекуперації енергії.

З аналізу досліджень управління силовими установками автомобілів використовують методи розрахункового інтелекту [31,32]. Управління на підставі нечітких правил і систем нечіткого висновку використовується в роботах [33-35], а в роботах [46,46] досліджується можливість використання генетичних алгоритмів для налагоджування систем нечіткого висновку. Використання штучних нейронних мереж (ШНМ) при управлінні силовою установкою наведено в роботах [51,52]. Сумісному використанню (ШНМ) та систем нечіткого висновку присвячені роботи [51-55]. Наведені дослідження вказують на значний потенціал покращення експлуатаційних характеристик гібридних та електромобілів на підставі ефективного управління потужністю при використанні технологій розрахункового інтелекту.

Є три підходу до будови силових установок гібридних та електромобілів, які відрізняються принципами реалізації стратегії управління при вирішенні другого рівня ієрархії. Це використання логічних правил вибору стратегії або використання методів теорії оптимального управління та використання алгоритмів адаптації до зовнішніх умов експлуатації гібридних та електромобілів.

На практиці поширеним є вибір стратегії управління силовою установкою на підставі логічних правил та табличне задання законів регулювання (logic based control strategies). Такий підхід має назву Rule Based (RB) – заснований на правилах [56–60].

Правила та закони управління встановлюють розробники силових установок шляхом використання евристичних методів і аналізу результатів розрахункового експерименту. В даному випадку не враховуються особливості конкретних умов експлуатації, які впливають на ефективність роботи силової установки. Отже, такий підхід не дозволяє використовувати в повній мірі 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 в порівнянні з базовим автомобілем.

Логіка функціонування силової установки може задаватися за допомогою бази нечітких правил та використовувати систему нечіткого висновку. Також для апроксимації законів регулювання або характеристик агрегатів використовується ІНМ [35].

Принцип управління на підставі логічних правил використовується в силових установках більшості гібридних та електромобілів. В роботі [59] використано штучні нейронні мережі в системі управління силовою установкою транспортного засобу з метою зменшення витрати енергії та діагностики off-line технічного стану тягової акумуляторної батареї. За допомогою симулятора навчається непромережена модель автомобіля, яка використовує для off-line навчання нейроконтролера. Якість навчання нейроконтролера визначається симулятором. Для подальшого функціонування системи управління параметри нейронних мереж не змінюються. Відсутність адаптації вагових коефіцієнтів при функціонуванні системи управління обґрунтовано тим, що це веде до втрати довго часової пам'яті системи при виникненні кратко часової несправності, а також можливості виникнення біфуркацій при адаптації в нелінійних системах наведено на (рис. 1.1).

Цільова функція оптимізації управління має на увазі мінімізацію витрати енергії при збереженні ступеню заряду тягової акумуляторної батареї при обмеженому діапазоні руху транспортного засобу в заданих умовах експлуатації:

$$\text{cost}(t) = \lambda_1 \cdot sf^2(r) + \lambda_2 \left(SOC^d(t) - SOC(t) \right)^2$$

де $\lambda_1 = 1$ і λ_2 - вагові коефіцієнти, $\lambda_2 = 10$, при $SOC \geq SOC^d$ і $\lambda_2 = 50$ при $SOC < SOC^d$;

sf - рівень витрати енергії (fuel rate);

SOC^d - бажана ступінь зарядженості тягової акумуляторної батареї.

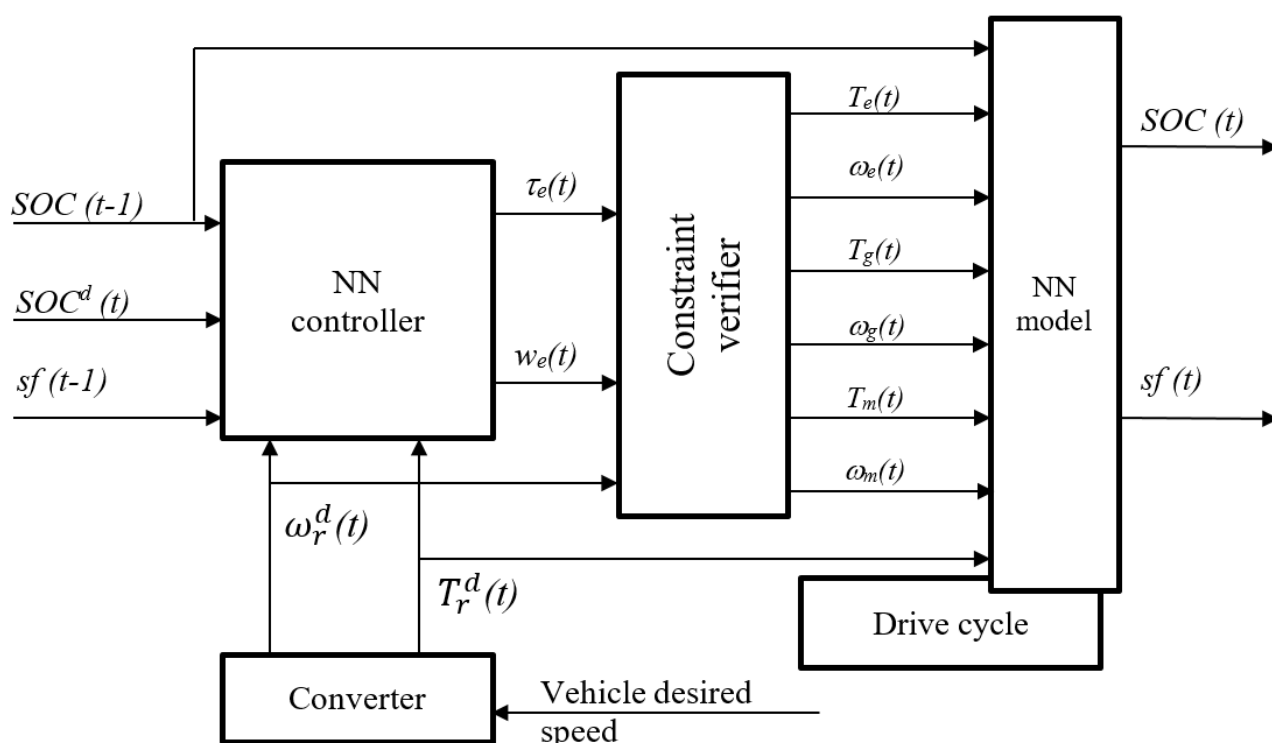


Рисунок 1.1 – Навчання нейроконтролера

Нейроконтролер (NN controller) має тришаровий рекурсивний персептрон з п'ятьма входами, 10 нейронів в закритому слої та два вихідних нейрона. В кожний момент часу t на вхід нейронної мережі подається п'яти компонентний вектор $[w_r^x(t), T_i^r(t), sf(t-1), SOC_i^d, SOC^d(t-1)]$. На підставі даного вхідного вектору нейронна мережа визначає нормовані значення крутного моменту і швидкості обертання валу двигуна, які потім перетворюють в реальні сигнали управління силовою установкою в блоці Constraint verifier.

Процес навчання непромереженої моделі і нейроконтролера розглядається як задача оптимальної фільтрації з використанням фільтра Калмана. Вагові коефіцієнти нейронної мережі представлені як вектор стану динамічної системи. Нейромережева модель навчається протягом 3000 епох на масиві даних, які мають пари сигналів вхід-вихід від 20 різних умов роботи силової установки, генеруючих симулятором. Навчання нейроконтролера ведеться протягом 1200 епох.

За результатами випробувань метода нейроуправління в роботі [31] наведено, що нейроконтролер забезпечує зменшення витрати палива на 17 % і скорочує діапазон зміни ступеня зарядженості тягової акумуляторної батареї на

35 %, а також забезпечує мінімізацію викидів токсичних речовин. Для поліпшення експлуатаційних характеристик силової установки використовують цільову функцію оптимізації нейроконтролера параметрів в наявному вигляді. Недоліком методу слід визнати відсутність адаптації стратегії управління до зміни режиму руху.

Роботи [35,38,39] присвячені використанню нечіткої системи управління економічністю та екологічною безпекою гібридних автомобілів з паралельною схемою силової установки (рис. 1.2). Перевірка ефективності наведеної системи управління силовою установкою виконувалася шляхом модулювання руху автомобіля в різних умовах експлуатації. При налагоджуванні нечіткого контролера на режим зменшення викидів оксиду азоту, то викиди зменшуються на 10 %, а витрати палива – на 25 %.

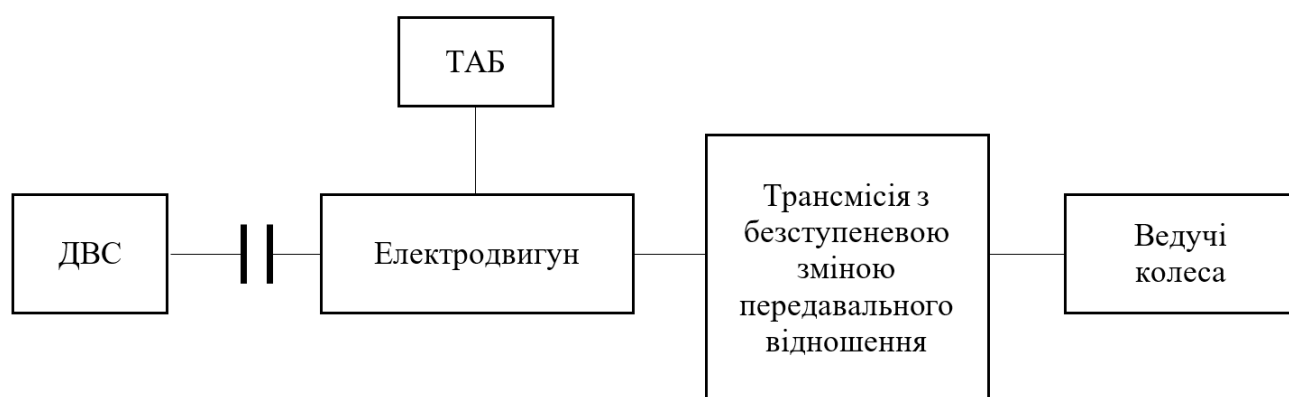


Рисунок 1.2 – Структурна схема гібридної силової установки з паралельною схемою

Недоліком такого підходу до управління силовою установкою є неможливість враховувати більш одного критерія оптимальності при наладці нечіткого контролера та відсутність адаптації до зовнішніх умов експлуатації.

Метод синтезу нечіткої системи управління силовою установкою гібридного автомобіля з паралельною схемою будови передбачає ефективний перерозподіл крутного моменту між ДВЗ та тяговим електроприводом на основі

аналізу керуючого впливу з боку водія, ступеня зарядки тягової акумуляторної батареї і швидкості обертання ротора електродвигуна (рис. 1.3).

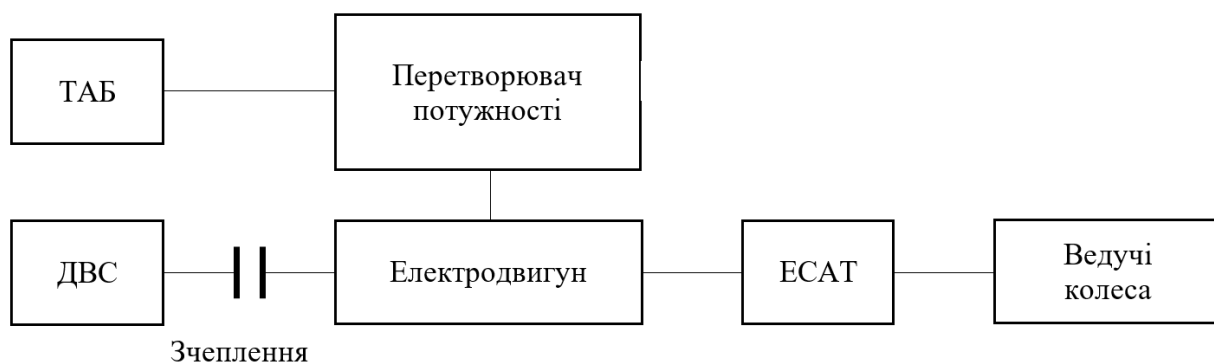


Рисунок 1.3 – Структурна схема гібридної силової установки

Робота нечіткого контролера заснована на трьох принципах: ступінь зарядженості тягової акумуляторної батареї не повинна мати низьку зарядку; керуючі впливи з боку водія від педалей акселератора та гальма задовольняють постійно, виключно випадків, коли вони протирічать першому принципу; оптимізація загального ККД основних компонентів гібридної силової установки і якщо не протирічать першому і другому принципам.

Оптимальна ступінь зарядженості акумуляторної батареї визначається за мінімуму її внутрішнього опору. Якщо батарея розряджена нижче цього значення включається режим активної підзарядки шляхом відбору частини потужності від ДВЗ. Якщо батарея заряджена вище оптимального значення використовується в електроприводі для створення тягового зусилля.

Розглянуті принципи управління гібридною силовою установкою реалізовані у вигляді бази правил нечіткого висновку в нечіткому контролері, який є головним в системі управління (рис. 1.4). На даній схемі інтерпретатор команд водія (DCI) перетворює сигнали з педалей акселератора і гальма відповідно крутному моменту силової установки T . Сигнал пропорційний куту повороту педалі акселератора множать на максимальний крутний момент ДВЗ $T_{ред\max}$, відповідно поточному швидкісному режиму. Момент $T_{род\max}$ визначається відповідно передачі, яка відповідає його максимальному значенню при даній швидкості.

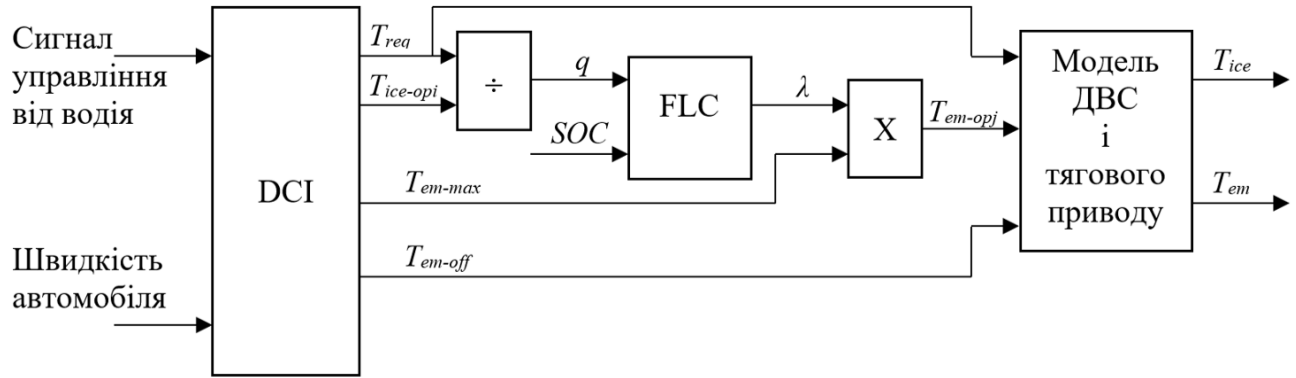


Рисунок 1.4 – Структурна схема системи управління гібридною силовою установкою

На вхід FLC надається частне відділення $g = T_{reg} / T_{ice}$, а також ступінь зарядженості тягової акумуляторної батареї (SOC). На підставі цієї інформації методом нечіткого висновка визначається оптимальне значення крутного моменту тягового електроприводу в нормалізованому вигляді (λ). Реальне значення крутного моменту електроприводу визначається за виразом

$$T_{em-adj} = \lambda \cdot T_{em-max},$$

де T_{em-max} максимальний крутний момент для даної швидкості обертання ротора.

Останній блок структурної схеми визначає кінцеве значення крутних моментів ДВЗ та тягового електродвигуна. Більшість випадків $T_{em} = T_{em-adj}$ і $T_{ice} = T_{ped} - T_{em}$.

Але є виключення:

Якщо T_{em-adj} і $T_{ped} - T_{em-adj} < T_{ice-off}$, то $T_{ice} = 0$; $T_{em} = T_{ped}$.

Якщо $T_{em} - T_{em-adj} > T_{ice-max}$, то $T_{ice-max} = T_{ice} : T_{em-adj}$.

Недоліком даного методу є відсутність адаптації управління до змінного режиму руху та оптимізації без урахування екологічної безпеки.

Враховуючи можливість використання негладких та розривних управляючих впливів більш спроможні використовувати для пошуку оптимального управління силовою установкою принципу максимум, які висунуті Л.С. Понтрягіним, В.Г. Болтянським, Е.Ф. Міщенко [64, 65]. Поставлену задачу є можливість рішення за допомогою динамічного

програмування, який засновано на принципі оптимальності, розроблений Р. Белманом для рішення багато шагових задач оптимізації дискретних процесів. Оптимальне управління в будь-який момент часу не залежить від наступного стану системи та визначається тільки її поточним станом і метою управління. Формулювання принципу є справедливим і для систем неперервного часу. Використання методу динамічного програмування можливо і для нестационарних задач, які для опису об'єкта та функціоналу якості мають функції часу [63-66].

Аналітичне рішення задач оптимального управління можливо тільки в простих випадках. Такі задачі можуть бути сформульовані тільки для ідеалізації, коли замість поставленої задачі вирішується інша. Головним підходом до рішення реальних задач є приближення чисельної оптимізації.

Отримані в результаті рішення оптимізаційних задач оптимальний управляючий вплив силової установки використовується при формулюванні логічних правил вибору стратегії управління, а також при науковому обґрунтуванні основних параметрів та характеристик систем і агрегатів силової установки. В окремих випадках методи оптимального управління мають алгоритми адаптації стратегії до зовнішніх умов експлуатації [48-50].

Ефективність використання методів теорії оптимального управління для визначення управляючих впливів силової установки гібридних та електромобілів наведено в роботах [68–70].

Цільовою функцією оптимізації гібридної силової установки є мінімізація витрати палива та токсичних викидів для заданих умов роботи. Чисельне рішення оптимізаційної задачі виконується за допомогою методу послідовного квадратичного програмування (SQP). Методи математичного моделювання і (off-line) оптимізації стратегії управління силовими установками розглянуто в роботі [71].

Можливість оптимізації управління силовою установкою гібридного автомобіля з паралельною схемою можливо з використанням принципу максимуму Понтрягіна досліджено в роботі [72]. Критерієм оптимальності є

мінімум витрати палива, але забруднення навколишнього середовища викидами токсичних компонентів відпрацьованих газів не враховуються.

Є достатня кількість досліджень, присвячених методу динамічного програмуванню для прийняття оптимальних управляючих впливів силових установок гібридних та електромобілів [73–76]. Це дозволяє визначити оптимальну стратегію управління тільки для фіксованих умов експлуатації і не працюють при змінних умовах роботи транспортного засобу.

1.2 Зміни технічного стану силових установок гібридних автомобілів від зовнішніх умов

Діагностування, ремонт автомобілів з електромеханічними гібридними установками є проблемою. ГСУ в сукупності з бортовим комп'ютером автомобіля і іншими його вузлами є складовою системою, що вимагає спеціальних підходів при визначенні технічного стані та ремонті. Саме така проблема виникає при експлуатації подібних автомобілів. Зокрема гібридних автомобілів TOYOTA, Lexus, Honda, Ford – найбільш поширених в Україні, їх кількість займає більше ніж 50 % від всього автопарку гібридних автомобілів. У свою чергу від технічного стану автомобіля безпосередньо залежить безпека учасників дорожнього руху.

В процесі експлуатації погіршення ефективних показників елементів ГСУ може бути викликано нормальним зносом деталей, відсутністю необхідного технічного обслуговування, іншими взаємопов'язаними причинами. У той же час несправності можуть бути не явними, тобто виникаючими тільки в певних умовах, не завжди визначаються або не визначеними статистичними вимірами.

Оцінка несправностей ГСУ вимагає проведення об'єктивного дослідження і слід визначати за реальними умовами експлуатації. Найбільш підходящим місцем для повноти та достовірності одержуваної інформації є підприємства, що спеціалізуються на ремонті гібридних автомобілів і для отримання об'єктивних

даних проведено аналіз бази даних по ремонтваних і обслугованих гібридних автомобілів.

Аналіз результатів експлуатаційної надійності містить відомості відмов і несправностей, оцінки кількісних показників надійності, перелік деталей, систем, що лімітують працездатність ГСУ автомобіля, таблиця 1.1 [78].

З аналізу літературних джерел [77] щодо розподілу відмов і несправностей ГСУ найбільше їх кількість безпосередньо пов'язане з двигуном внутрішнього згоряння (рис. 1.5). Складність виявлення несправності цього вузла пояснюється тим, що перевірити роботу двигуна внутрішнього згоряння в даному випадку важко, його запуск і управління здійснює ЕБК і тільки в режимі споживання потужності.

Таблиця 1.1

Розподіл відмов гібридної силової установки

	Найменування агрегату і системи	Відмови по інтервалах напрацювання, тис. км							Всього, %
		0-25	25-50	50-75	75-100	100-125	125-150	150-175	
1	Двигун:	0	0	6	14,5	16,5	16	18	71
	- система запалювання	0	0	6	13	12	10	10	-
	- система керування двигуном, датчики	0	0	0	0	1	2	2	-
	- система живлення	0	0	0	1,5	3	4,5	6	-
2	Пристрій розподілу потужності (PSD):	0	0,5	0,5	2	4,5	5,5	8	21
	- система охолодження	0	0	0	1	2,5	3	4	-
	- зубчасті механізми	0	0	0	0	0,5	0,5	1,5	-
	- система змащення трансмісії	0	0,5	0,5	1	1,5	1	2,5	-
3	Електроніка:	0	0	0	0	0,5	2	3	5,5
	- несправність силових ключів інвертора	0	0	0	0	1	1	1,5	-
	- несправність обмотки статора MG2	0	0	0	0	0	1	1,5	-
4	Високовольтна батарея:	0	0	0	0	0	0,5	2	2,5
	-недопустимий розряд АКБ	0	0	0	0	0	0	0,5	-
	- закипання, вихід зі строю елементів АКБ	0	0	0	0	0	0	0,5	-
	- втрати ємності АКБ	0	0	0	0		0	0,5	-
	- несправність інших частин АКБ	0	0	0	0	0	0	0,5	-
	Всього	0	0,5	3,5	8,5	20	29	38	100

Також існує зв'язок між відмовами ДВЗ і електронними компонентами систем ГСУ. Відмови високовольтної тягової акумуляторної батареї (ТАБ) в період експлуатації викликані нормальним її зносом і складають 2,5 % від загального числа несправностей. Головною причиною виникнення відмов ТАБ є експлуатація автомобіля з несправним ДВЗ, що приводить до недопустимого розряду високовольтної ТАБ і руйнування її елементів.

На надійність елементів ГСУ впливають кліматичні умови експлуатації. При зниженні температури збільшується потреба в роботі непрогрітого ДВЗ і збільшується загальний час роботи ДВЗ і при повному заряді ТАБ. Дані фактори знижують економічність гібридного автомобіля, витрата палива збільшується на 15...30 % [79, 71]. Крім того при низькій температурі збільшується кількість відмов системи управління ДВЗ до 23 % від загальної кількості несправностей.

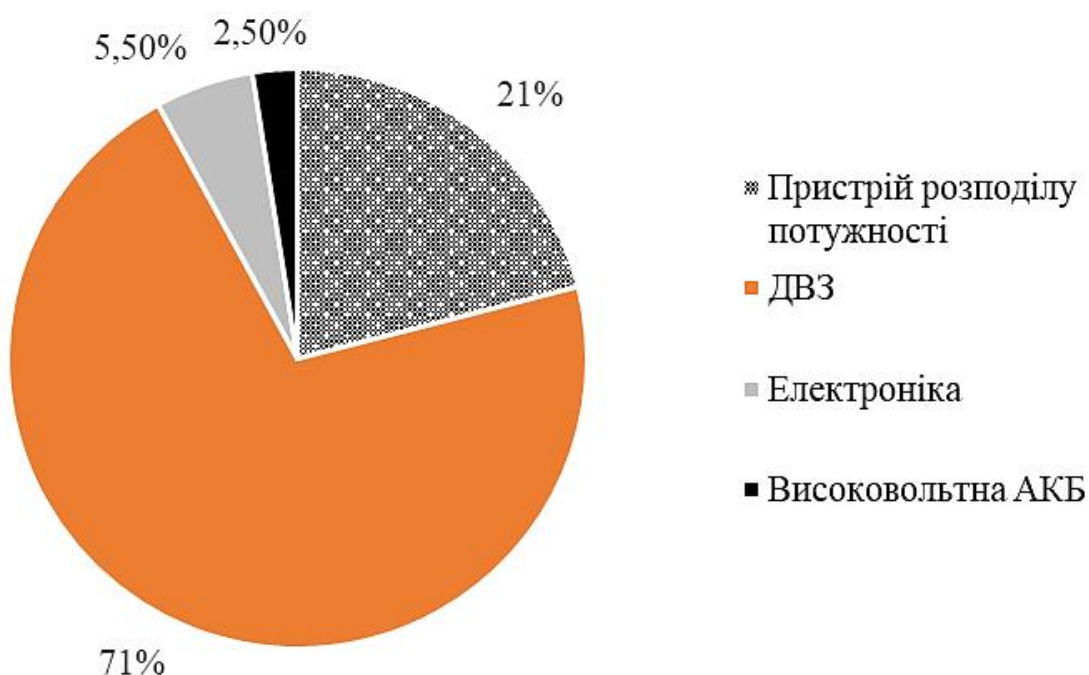


Рисунок 1.5 – Діаграма розподілу відмов по елементах ГСУ []

Аналіз роботоздатності ТАБ в умовах низьких температур ємність може знижуватися на 15...25 % при струму розряду 0,5...1,0 C^0 і температурі зовнішніх умов менше $-10 C^0$, а саморозряд знижується з 3 % до 1 % за день [80, 83]. При експлуатації ТАБ при низькій температурі має зменшення ресурсу до

15 % [85]. Цей факт пояснюється уповільненням рушійних хімічних реакцій ТАБ за рахунок якісного охолодження ТАБ. Крім того ДВЗ працює більше часу при прогріві, що дозволяє ТАБ частіше залишатися в зарядженому стані.

Під час експлуатації ТАБ виникає розбалансування елементів по ємності, внутрішньому опору та іншим параметрам, що знижує ефективність батареї в цілому. Виникає окислення мідних контактних пластин в ТАБ. Автомобіль реагує на зниження якості ТАБ підвищенням витрати палива, некоректною індикацією рівня заряду і розряду батареї, попереджує сигналізацією і падінням потужності в цілому.

Характер зміни технічного стану ГСУ в залежності від пробігу може бути різний. На рисунку 1.6 представлені апроксимуючі криві зміни закономірностей систем ГСУ за даними таблиці 1.1 [59, 64].

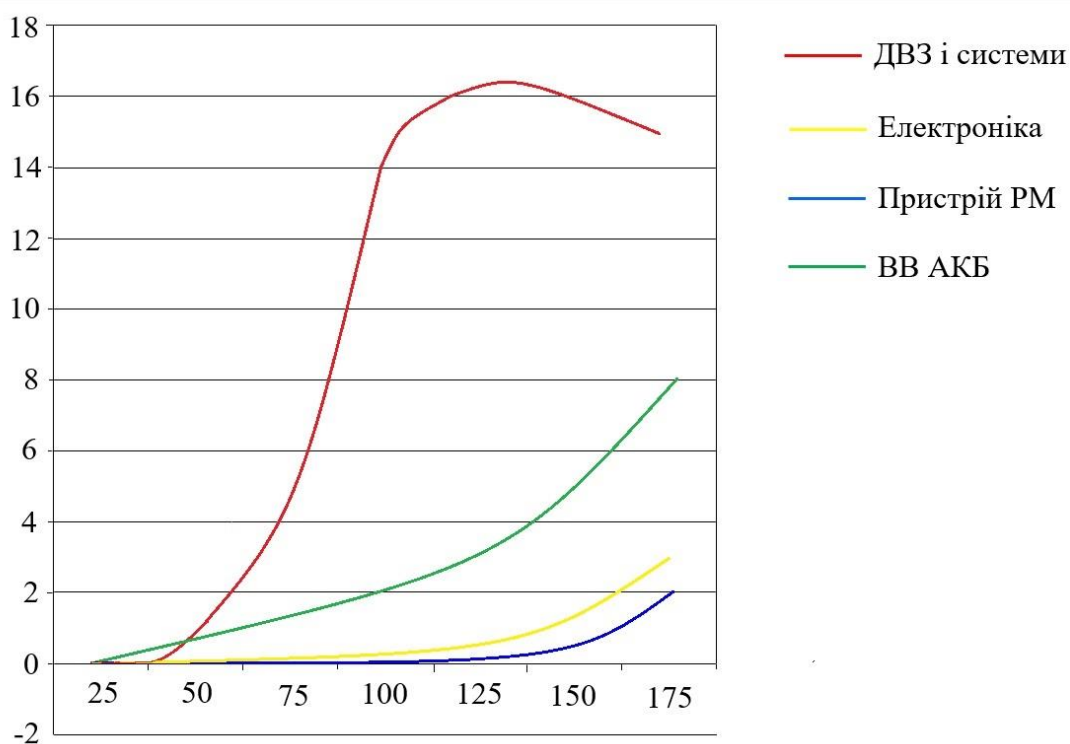


Рисунок 1.6 – Апроксимуючі криві відмов систем

Аналізом залежностей (рис. 1.6) видно, що розподіл потоку відмов систем ГСУ по інтервалах носить наростаючий характер. Виходячи зі статистичних даних найбільше число відмов ГСУ пов'язані з ДВЗ і його системами, інші відмови найчастіше є наслідком його несправності.

1.3 Використання інформаційних систем оцінки технічного стану силових установок гібридних автомобілів

Під інформаційною системою (ІС) будемо розуміти впорядковану організаційно і взаємопов'язану сукупність програмно-технічних засобів і методів, які використовують сучасні інформаційні технології, і застосовуваних для збору, обробки, зберігання, відображення і передачі інформації з метою вирішення поставлених завдань [86, 90].

Інформаційна система в автотранспортних засобах застосовується в якості основних технічних засобів переробки інформації та засоби зв'язку, що дозволяють реалізувати різні інформаційні процеси і висновок інформації, необхідної при прийнятті рішень в задачах будь-якої складності і для різних предметних областей [87].

Інформаційна система являє собою особливе середовище, що включає сукупність використовуваних комп'ютерів, локальних і глобальних комп'ютерних мереж зв'язку, програмних продуктів і інструментальних засобів їх розробки, баз даних, користувачів, інших різних технічних засобів підтримки інформаційних технологій і т. Д. [88–91]. В рамках класифікації ІС можна виділити два основні класи систем інформаційно-вимірювальні та інформаційно-керуючі системи.

Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) являє собою комплекс вимірювального обладнання, пристроїв обробки та передачі даних, що забезпечують автоматичний збір інформації, яка вимірюється кількісно, безпосередньо від досліджуваних автомобілів – за допомогою процедур вимірювання та контролю, аналізу і обробки інформації, а також відображення її у вигляді числових даних, висловлювань, графіків, таблиць, діаграм та ін., що відображають стану автомобілів [93].

Інформаційно-вимірювальна система – це «сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних, обчислювальних та інших допоміжних технічних

засобів, для отримання вимірювальної інформації, її перетворення, обробки з метою представлення споживачеві (в тому числі для введення в інформаційно-керуючу систему) в необхідному вигляді, або автоматичного здійснення логічних функцій контролю, діагностики, ідентифікації».

Під інформаційно-керуючою системою (ІКС) будемо розуміти певну сукупність програмно-апаратного комплексу засобів, методів, алгоритмів автоматизації інформаційних процесів моніторингу та реалізації керуючих впливів гібридними автомобілями [84, 87].

Виділимо наступні основні компоненти інформаційно-керуючої системи [66, 72]:

- людський фактор (аналітики, розробники, програмісти, користувачі, консультанти, інженери, лаборанти, техніки);
- інструментальні засоби розробки програмного забезпечення;
- системне і прикладне програмне забезпечення;
- математичне та методологічне забезпечення;
- апаратне забезпечення;
- інформаційні технології.

Основна концепція інтелектуального транспортного засобу полягає в його здатності постійно контролювати дії водія, автомобіль і навколишнє середовище, а також допомагати водієві ефективно і безпечно керувати. Зараз велика увага приділяється проблемі ефективного використання енергетичних витрат силовою установкою гібридних та автомобілем в залежності від зовнішніх умов. Останнім часом основна увага зосереджена на вдосконаленні технічних можливостей транспортного засобу.

Електронні системи транспортних засобів виконують функцію закритих систем, оскільки отримують інформацію від різних датчиків транспортного засобу і аналізують її за допомогою програм та виробляють в електронному блоці управління (ЕБУ) відповідні команди виконавчим пристроям з метою підвищення ефективності функціонування силової установки гібридного або електромобіля. Взаємодія між електронними блоками управління виконується

завдяки шинним архітектурам, які представляють сукупність контролерів (CAN), а також спеціальну мережу, призначену для передачі інформації спеціального цифрового обладнання – MOST, mediaoriented systems trans, Flex Ray, а також Local interconnect, (LIN).

Програмне забезпечення в гібридному складається з безліч компонентів, яке залежить від апаратної частини. Взаємодія між усіма функціями визначається в архітектурі і має різні відображення. Статичне відображення ієрархічно описує функціональні групи, сигнали і розподіл ресурсів. Динамічне відображення аналізує відгук при виконанні різних завдань. Найбільш важливі стандарти наведено нижче.

Асоціація стандартизації автоматизованих і вимірювальних систем (ASAM) займається стандартизацією в автомобільній промисловості стосовно моделям даних, інтерфейсів і синтаксису. ASAM розробила різні стандарти для підключення ЕБУ до комп'ютера введення даних. Стандарт ASAM-MCD1 (MCD – вимір, калібрування та діагностика) підтримує протоколи передачі даних. Стандарт відображає відповідні дані у вигляді фізичних значень і одночасно обробляє їх, а також дозволяє автоматично калібрувати дані і регламентувати обмін функціональними описами та даними.

Консорціум Flex Ray розробив специфікацію для польової шини для регулювання по розімкненому і замкнутому циклу транспортних засобів.

Завдяки високій швидкості передачі даних із запрограмованим арбітражем шини і відмовостійкості конструкції активно використовується в системах активної безпеки і в силових системах гібридних автомобілів.

Міжнародна електротехнічна комісія (IEC) встановлює стандарти в галузі електротехніки та електроніки і пропонує три системи аналізу щодо відповідності міжнародним стандартам. IEC взаємодіє з міжнародною організацією зі стандартизації (ISO), міжнародним телекомунікаційним союзом (ITU) і численними органами стандартизації [68, 73].

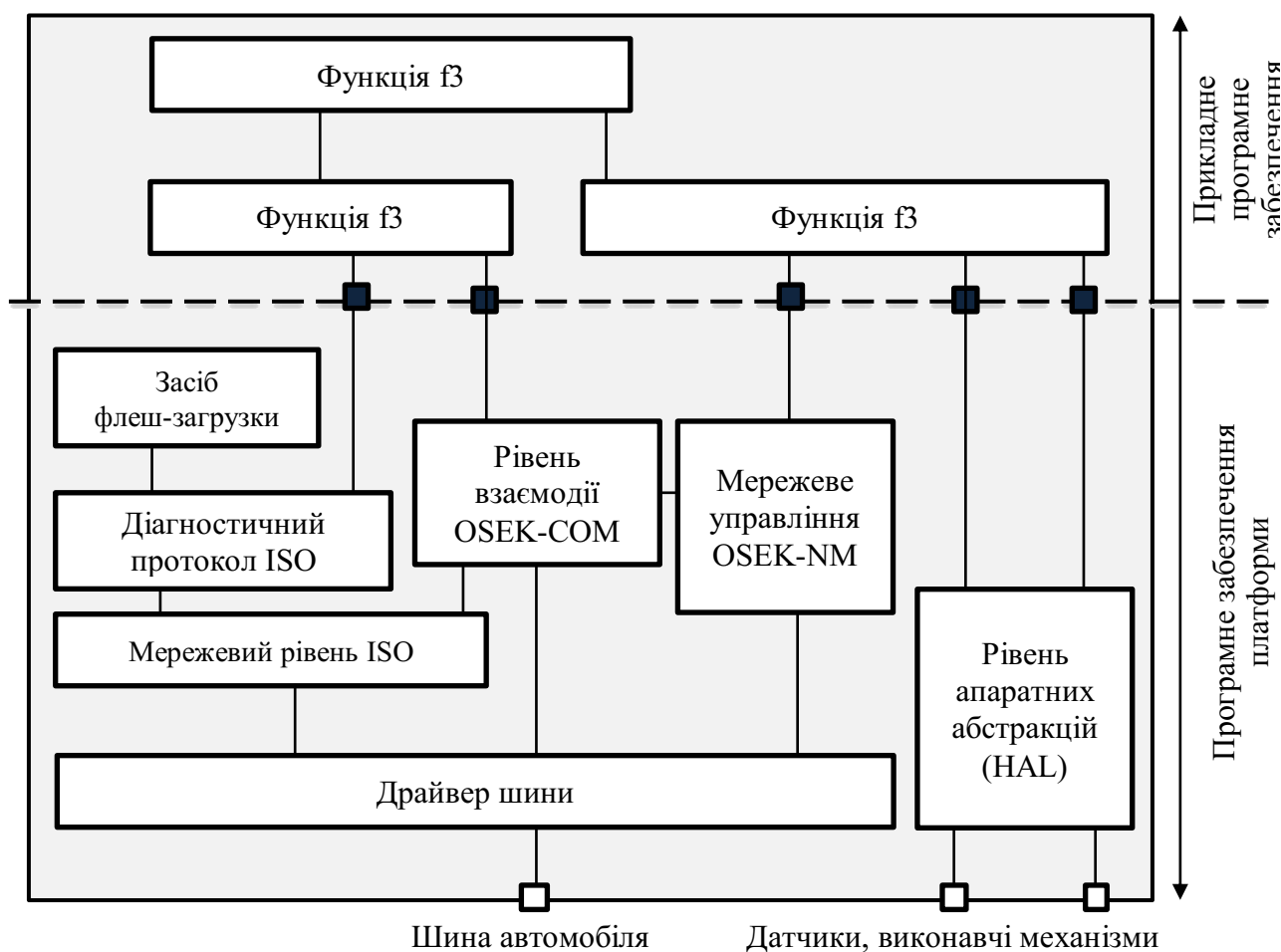
Асоціація розробників програмного забезпечення для автомобілів (MISRA) встановлює правила для розробки і впровадження програмного

забезпечення в автомобільних системах. Стандарт програмування MISRA-C дозволяє уникнути помилок при виконанні або виникнення слабких місць в структурі та захистити правильність виразів. Багато правил можуть автоматично перевірятися та враховуватися при генеруванні кодів.

Системне програмне забезпечення, яке керує гібридним і електромобілем, наведено на рис. 1.7 і складається з таких основних підсистем: сприйняття, планування місії, здійсненої поведінки і планування руху. Ці підсистеми складаються з декількох процесів і передачі повідомлень відповідно до обраної топології [84,85].

Зауважимо, що система керування силовою установкою гібридного і електромобіля має низку характерних особливостей, що вимагають організації і проведення досліджень з метою забезпечення можливості застосування готових програмних продуктів. Відомі системи AUTO SAR здатні вирішувати питання автоматизації процесу створення програмного забезпечення для розроблюваних систем управління [76]. Однак, в технічній документації до цих систем немає відомостей про методи та алгоритми, що дозволяють в реальному масштабі часу синтезувати енерго і ресурсозберігаюче управління силовими установками.

Створювані інформаційні системи управління силовими установками якраз повинні мати здатність до управління за різними критеріями, що забезпечує енерго- і ресурсозбереження, а також високу безпеку транспортного процесу без зниження якості гібридних автомобілів [57, 68]. Перераховані вимоги надають суперечливі впливу на завдання управління. Одночасне їх використання істотно ускладнює математичне і методологічне забезпечення проекрованої системи управління, а також її технічну реалізацію. Рішення задач управління по комплексному критерію недостатньо розглянуто в літературі, тому створення ПУС діагностування силових установок гібридних автомобілів по комплексними критеріями є своєчасною і актуальною задачею.



□ апаратний інтерфейс ■ інтерфейс прикладного програмного забезпечення

Рисунок 1.7 Загальна архітектура системи, яка включає основні підсистеми та канали передачі даних.

1.4. Висновки до розділу

У результаті проведеного аналізу стану питання можна зробити наступні висновки:

1. Сучасний стан розвитку ринку і оновлення структури гібридних автомобілів, які експлуатуються в умовах України зумовлюють необхідність комплексного підходу до оцінки їх технічного стану з метою вибору найкращої технології діагностування гібридної силової установки, які експлуатуються в умовах України.

2. Аналіз підходів, принципів і методів діагностування гібридних силових установок показує необхідність їх подальшого розвитку та вдосконалення.

Більшість викладених технологій діагностування гібридних силових установок не дозволяють об'єктивно проводити комплексну оцінку їх технічного стану за діагностичними параметрами, оскільки не відпрацьовано механізм їх спільного нормування і приведення до єдиної шкали вимірювання.

3. Аналіз відмов і несправностей, які виникають в ГСУ автомобіля, свідчать про те, якщо проводити додаткові діагностичні операції та заміни запчастин не передбачених заводом виробником при технічному обслуговуванні, то зменшиться ймовірність відмов силової установки. Тим самим можна уникнути простій автомобіля в ремонті або заощадити витрату палива.

На підставі проведеного аналізу стану питання і відповідно до поставленої мети в дисертаційній роботі вирішувалися такі завдання:

1. Теоретичне обґрунтування діагностичної оцінки технічного стану гібридної силової установки автомобіля.

2. Системний вибір критеріїв оцінки технічного стану гібридної силової установки транспортного засобу.

3. Розробити нейромережеву модель оцінки технічного стану гібридної силової установки.

4. Встановлення закономірностей зміни технічного стану гібридної силової установки з урахуванням зовнішніх умов експлуатації.

5. Результати досліджень першого розділу дисертації опубліковано в роботах [1, 5,6].

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

2.1 Вихідні положення

ГСУ як керована система може ідеалізуватися настільки, що в кожен фіксований момент часу спостереження $t = t'$ на інтервалі $T = \{t | t_s \leq t \leq t_f\}$, $t' \in T$ його властивості можуть бути описані двома дійсними числами: $\omega(t')$ – поточна кутова швидкість обертання провідних коліс; $\theta_{TAB}(t')$ – стан накопичувача енергії (ступінь зарядженості тягової акумуляторної батареї). Розглядатимемо дані величини як компоненти вектору стану системи $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t) = [\omega(t), \theta_{TAB}(t)]^T$ у момент часу t' .

Множина всіх можливих станів в різні моменти часу $t \in T$ утворюють двовимірний простір станів $\mathbf{X}$:

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X} \subset \mathbb{R}_+^2, \forall t \in T, \mathbf{X} = \left[\begin{array}{l} 0 \leq \omega \leq \omega_{\max} \\ 0 \leq \theta_{TAB} \leq 1 \end{array} \right], \quad (2.1)$$

де $\omega_{\max}$ – максимальна кутова швидкість обертання ведучих коліс.

На множині $\mathbf{X}$ можна виділити підмножину експлуатаційних станів:

$$\mathbf{X}_{ex} = \left[\begin{array}{l} 0 \leq \omega \leq \omega_{ex.\max} \\ \theta_{ex.\min} \leq \theta_{TAB} \leq \theta_{ex.\max} \end{array} \right] \subset \mathbf{X}. \quad (2.2)$$

Вихід стану системи за межі $\mathbf{X}_{ex}$ небажаний, хоча і не веде до аварійної ситуації.

Розглядатимемо автомобіль з ГСУ як багатовимірний нелінійний стаціонарний об'єкт виду:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \xi) \\ \mathbf{y} = h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \end{cases}, \quad (2.3)$$

де $\mathbf{u}$ – вектор управління $\mathbf{u} = [\beta_D, \beta_M, \beta_T, \gamma]^T$;

β_D – сигнал управління потужністю ДВЗ;

$\beta_D = -1$ відповідає відключеному стану ДВЗ;

β_M – сигнал управління допоміжною силовою установкою (електромагнітним моментом ВЕД);

β_T – сигнал управління системою гідравлічного гальмування;

γ – передавальне відношення трансмісії автомобіля.

ξ – вектор збурюючих впливів $\xi = \xi(t) = [\alpha(t), \vartheta_0(t)] \in \mathbb{R}^2 \quad \forall t \in T$;

α – ухил дороги;

ϑ_0 – швидкість зустрічного вітру;

y – вектор виходу: $y = y(t) = [V(t), G_T(t), E_T(t)]^T \in \mathbf{Y} \subset \mathbb{R}_+^3 \quad \forall t \in T$;

V – швидкість автомобіля;

G_T – годинна витрата пального ДВЗ;

$E_T = f_T(C_{NOx}, C_{CO}, C_{HC})$ – ступінь токсичності відпрацьованих газів ДВЗ, яка є функцією годинної емісії токсичних компонентів;

C_{NOx}, C_{CO}, C_{HC} – годинна емісія оксидів азоту, оксиду вуглецю і вуглеводнів відповідно;

$f(\cdot)$ і $h(\cdot)$ – відомі безперервні або кусочно-безперервні вектор-функції векторних аргументів, визначені на відповідних множинах.

Вважаємо, що дії, що управляють, мають бути обмежені, тобто $u \in \mathbf{U} \subset \mathbb{R}^4 \quad \forall t \in T$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \beta_D = -1, & 0 \leq \beta_D \leq 1 \\ -1 \leq \beta_M \leq 1 \\ 0 \leq \beta_T \leq 1 \\ \gamma \in \{\gamma_i\}, i = \overline{1,5} \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Вектор управління може бути заданий як програмне управління:

$\mathbf{u} = \mathbf{u}(t) = [\beta_D(t), \beta_M(t), \beta_T(t), \gamma(t)]^T$ або у вигляді координатного управління:

$\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}) = [\beta_D(\mathbf{x}), \beta_M(\mathbf{x}), \beta_T(\mathbf{x}), \gamma(\mathbf{x})]^T$.

Компоненти вектору управління в значній мірі визначаються типом ГСУ. У ряді випадків до складу вектору управління може бути включено керуючий вплив муфти зчеплення β_S . При послідовно-паралельній схемі побудови ГСУ, що використовує планетарний механізм для розділення потоку потужності, відсутнє управління передавальним відношенням трансмісії ДВС γ . При цьому додається сигнал управління стартер-генератором β_G . В деяких випадках присутні керуючі впливи на багатоступінчатий планетарний знижуючий редуктор тягового електроприводу, стрічкове гальмо ланок планетарного механізму і так далі.

2.2 Критерії оцінки технічного стану гібридної силової установки

Основною функцією САУ ГСУ є виконання завдання стеження, тобто підтримка з мінімальною помилкою заданої швидкості автомобіля $V_{zd}(t)$ за наявності збурень $\xi(t)$, $t \in T$ і обмеженнях на можливі стани системи $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ і допустимі управління $\mathbf{u} \in \mathbf{U}$, $\forall t \in T$. Крім цього, процес управління повинен задовольняти ряду додаткових умов: мінімізації витрати пального, рівня токсичності відпрацьованих газів, відхилення ступеня зарядженості ТАБ від оптимальної. Кожна з цих умов може виражатися у вигляді відповідного критерію оптимальності – вимоги забезпечення екстремуму деякого функціонала $J_X \in \mathbb{R}_+^1$, залежного від виду функцій $V_{zd}(t)$, $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{y}(t)$ и $\xi(t)$, які є аргументами даного функціонала. Критерії оптимальності мають бути узгоджені між собою і з прийнятими обмеженнями для виключення тривіальних або вироджених рішень оптимізаційної задачі і, в той же час, достатньо точно описувати мету оптимізації [75]. Крім цього, критерії мають бути незалежні і

монотонні по преференції, тобто покращанню якості управління повинне відповідати зменшення значення відповідного критерію [76].

Для формальної постановки задачі оптимізації управління ГСУ на їздовому циклі, який задається функцією зміни швидкості $V_{zd}(t)$, $t \in T$, визначимо багатокритеріальний (векторний) функціонал якості $\mathbf{J} = \mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, T) = [J_V, J_\theta, J_G, J_E]^T$, $\mathbf{J} \in \mathbb{R}_+^4$. Окремими компонентами даного векторного функціонала є критерії оптимальності по кожній з умов, яким повинен задовольняти процес управління.

Внаслідок того, що окремі компоненти векторного функціонала мають різний фізичний зміст і діапазон зміни, їх нормування і приведення до безрозмірних величин може бути виконане згідно виразу [96]:

$$\mathbf{J}_i = \frac{\tilde{\mathbf{J}}_i - \mathbf{J}_{\min.i}}{\mathbf{J}_{O.i} - \mathbf{J}_{\min.i}}, \quad i = \overline{1, 4}, \quad (2.5)$$

де $\tilde{\mathbf{J}}_i$ – значення i -го критерію до нормування;

$\mathbf{J}_{\min.i}$ – мінімально-можливе значення відповідного критерію, отримане в результаті вирішення однокритеріальної задачі оптимізації без урахування решти критеріїв;

$\mathbf{J}_{O.i}$ – середнє значення i -го критерію при управлінні близькому до оптимального на заданому їздовому циклі.

Для випадку, коли $\mathbf{J}_{\min.i} = 0$ можна ввести нормуючі коефіцієнти

$$\mathbf{K}_{N.i} = \mathbf{J}_{O.i}^{-1}, \quad i = \overline{1, 4} \quad \text{для кожного з критеріїв: } \mathbf{K}_N = [K_{NV}, K_{N\theta}, K_{NG}, K_{NE}]^T.$$

Визначимо критерії оптимальності управління ГСУ на заданому їздовому циклі таким чином.

1. Критерій точності управління за швидкістю:

$$\mathbf{J}_1 = J_V(V, T) = K_{NV} \cdot \int_{t_s}^{t_f} \left((V_{zd}(t) - V(t))^2 + S_V^2(V(t)) \right) dt, \quad (2.6)$$

де S_V – функція штрафу за вихід з області експлуатаційних режимів $\mathbf{X}_{ex}$

$$S_V(V(t)) = \begin{cases} 0, & \text{ї дè } V(t) \leq V_{ex.max}, \\ V(t) - V_{ex.max}, & \text{ї дè } V(t) > V_{ex.max}; \end{cases} \quad (2.7)$$

$V_{ex.max}$ – максимальна експлуатаційна швидкість. $V_{ex.max} = \omega_{ex.max} \cdot r_{kol}$;

r_{kol} – радіус кочення ведучих коліс;

2. Критерій використання ТАБ:

$$\mathbf{J}_2 = \mathbf{J}_\theta(\theta_{TAB}, T) = K_{N\theta} \cdot \int_{t_s}^{t_f} \left((\theta_{ex.opt} - \theta_{TAB}(t))^2 + S_\theta^2(\theta_{TAB}(t)) \right) dt, \quad (2.8)$$

де $\theta_{ex.opt}$ – оптимальний ступінь зарядженості ТАБ.

S_θ – функція штрафу за вихід з області експлуатаційних режимів $\mathbf{X}_{ex}$

$$S_\theta(\theta_{TAB}(t)) = \begin{cases} 0, & \text{ї дè } \theta_{ex.min} \leq \theta_{TAB}(t) \leq \theta_{ex.max}, \\ |\theta_{ex.min} - \theta_{TAB}(t)|, & \text{ї дè } \theta_{ex.min} > \theta_{TAB}(t) > \theta_{ex.max}; \end{cases} \quad (2.9)$$

3. Критерій економічності ДВЗ:

$$\mathbf{J}_3 = \mathbf{J}_G(G_T, T) = K_{NG} \cdot \int_{t_s}^{t_f} G_T^2(t) dt; \quad (2.10)$$

4. Критерій ступеня токсичності відпрацьованих газів ДВЗ:

$$\mathbf{J}_4 = \mathbf{J}_E(E_T, T) = K_{NE} \cdot \int_{t_s}^{t_f} E_T(t) dt, \quad (2.11)$$

тоді E_T

$$E_T(t) = K_{ENOx} \cdot C_{NOx}^2(t) + K_{ECO} \cdot C_{CO}^2(t) + K_{EHC} \cdot C_{HC}^2(t); \quad (2.12)$$

де K_{ENOx} , K_{ECO} , K_{EHC} – коефіцієнти токсичності відповідних компонентів відпрацьованих газів. Дані коефіцієнти повинні визначатися з урахуванням впливу компонентів на здоров'ї людину і навколишнє середовище, а також їх питомого вмісту у відпрацьованих газах. При цьому повинне виконуватися співвідношення:

$$K_{ENOx} + K_{ECO} + K_{EHC} = 1. \quad (2.13)$$

При обчисленні критеріїв оптимальності в деяких випадках інтеграція може здійснюватися не на всьому інтервалі спостереження T , а в ковзаючому вікні шириною ΔT на інтервалах $[t, t + \Delta T]$ або $[t - \Delta T, t]$.

Враховуючи, що $\mathbf{y} = h(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ надалі можна вважати $\mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, T) = \mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T)$. рішення багато критеріальної задачі оптимізації управління приводить до формування множини $\mathbf{U}^P$ не покращувальних по Парето (Парето-оптимальних) управлінь $\mathbf{u}^{*P} \in \mathbf{U}^P \subset \mathbf{U}$ [71, 74]

$$\mathbf{U}^P = \left\{ \mathbf{u}^{*P} \in \mathbf{U} \mid \exists \mathbf{u} \in \mathbf{U} : \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \leq \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}^{*P}, T), i = \overline{1, 4}; \mathbf{u} \neq \mathbf{u}^{*P} \right\}, \quad (2.14)$$

де $\mathbf{J}_i$ – i -й компонент векторного функціонала.

Управління, що належать множині $\mathbf{U}^P$ не можуть бути покращені одночасно по всіх критеріях, тобто вони є незрівняними по векторному функціоналу, оскільки вимоги різних критеріїв суперечливі. Внаслідок цього, виникає проблема вибору єдиного управління з множини Парето на основі деякої схеми компромісу, при досягненні компонентами функціонала умовних мінімумів. Існує достатньо багато підходів до вирішення даної проблеми, які строго визначають властивості оптимального рішення і те, в якому сенсі оптимальне рішення перевершує решту всіх допустимих рішень [76].

Одним з підходів до забезпечення єдиного вирішення задачі векторної оптимізації є використання принципу гарантованого результату (мінімакса), згідно якому за оптимальне вважається управління $\mathbf{u}^* \in \mathbf{U}$, яке доставляє якнайкраще значення як найгіршому критерію якості:

$$\mathbf{u}^*(t) = \arg \min_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} \max_{i=1, 4} \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad \forall t \in T. \quad (2.15)$$

На різних ділянках їздового циклу пріоритети окремих критеріїв, складових векторного функціоналу, можуть змінюватися. Для урахування різного ступеня важливості критеріїв може бути введений вектор:

$$\mathbf{K}_P = [K_{PV}, K_{P0}, K_{PG}, K_{PE}]^T, \quad \sum_i \mathbf{K}_{P,i} = 1, \quad \mathbf{K}_{P,i} > 0, \quad i = \overline{1, 4}. \quad (2.16)$$

Вибір компонентів векторів $\mathbf{K}_P$ є нетривіальною задачею. Для її вирішення можуть бути використані метод аналізу ієрархій або метод класифікації альтернатив, викладені в [77].

Векторна функція оптимального управління при нерівнозначних критеріях:

$$\mathbf{u}^*(t) = \arg \min_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad \forall t \in T, \quad (2.17)$$

де J_{SV} – згортання векторного функціонала якості

$$J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) = \max_{i=1, 4} \{ \mathbf{K}_{P,i} \cdot \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \}, \quad J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \in \square_+^1. \quad (2.18)$$

Управління, що є рішенням мінімаксної задачі, в порівнянні з іншими управліннями гарантує найбільше віддалення найгіршого з компонентів векторного функціонала від межі області допустимих значень [77].

Основним недоліком даного підходу є можлива втрата гладкості отримуваної цільової функції $J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T)$, проте у багатьох випадках застосування мінімаксної згортки є достатньо зручним.

Інший підхід до отримання єдиного рішення оптимізаційної задачі передбачає зведення багато критеріальної оптимізації до однокритеріальної шляхом лінійного згортання векторного критерію в суперкритерій:

$$J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) = \sum_{i=1}^4 \mathbf{K}_{P,i} \cdot \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \in \square_+^1. \quad (2.19)$$

Простота і наочність даного підходу визначає його найбільше поширення. Разом з тим, ефективне використання лінійної згортки критеріїв можливо тільки у разі, коли парето-оптимальне рішення в просторі критеріїв оптимальності утворюють випуклу множину. Інакше деякі управління $\mathbf{u}^* \in \mathbf{U}^P$ не можуть бути отримані відповідним вибором $\mathbf{K}_P$. Крім того, у ряді випадків малим приростам вагових коефіцієнтів $\mathbf{K}_{P,i}$, $i = \overline{1, 4}$ відповідають великі прирости функціонала J_{SV} , і рішення оптимізаційної задачі може виявитися нестійким [78, 79].

Задачу оптимізації управління автомобільної ГСУ сформулюємо таким чином.

Для їздового циклу, визначуваного заданою функцією зміни швидкості автомобіля $V_{zd}(t)$, $t \in T$, знайти управління $\mathbf{u}^*(t)$, яке доставляє мінімум функціоналу $J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T)$ і задовольняє прийнятим обмеженням на можливі стани, допустимі управління і обмеженням у вигляді неголономних зв'язків:

$$J_{SV}^* = J_{SV}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, T) = \min_{\mathbf{u}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T),$$

$$\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}, \quad \mathbf{u}^* \in \mathbf{U}, \quad f_c(\dot{\mathbf{x}}^*, \mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*) = 0, \quad \forall t \in T. \quad (2.20)$$

При цьому значення J_{SV}^* називатимемо оптимальним значенням функціонала, а векторну функцію:

$$\mathbf{u}^*(t) = \arg \min_{\mathbf{u}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad (2.21)$$

що доставляє функціоналу оптимальне значення – оптимальним управлінням.

Обмеження у вигляді неголономних зв'язків $f_c(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0$ обумовлені динамічними властивостями власне автомобіля, ГСУ і апаратури управління. Вони визначаються кінематичною схемою ГСУ і трансмісії автомобіля.

2.3 Схема гібридної силової установки

Одним з можливих варіантів паралельної схеми побудови ГСУ є схема, при якій оборотна електрична машина (G/M) як допоміжний двигун встановлюється в приводі провідного моста ТЗ, відмінного від ведучого моста трансмісії первинного ДВЗ (рис.2.1). При гальмуванні автомобіля електрична машина, працюючи в генераторному режимі, може створювати необхідний гальмівний момент на колесах і забезпечувати рекуперацію кінетичної енергії ТЗ. Часто як оборотна електрична машина – допоміжний двигун застосовується вентильний електродвигун.

Управління ГСУ в даному випадку здійснюється за допомогою наступних управляючих впливів:

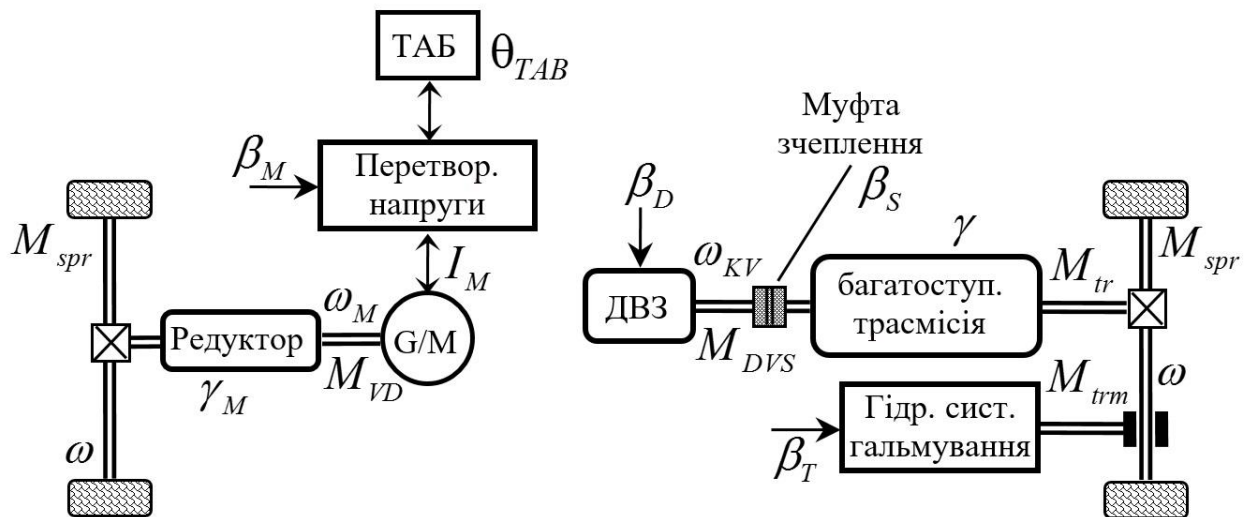


Рисунок 2.1 – Паралельна схема гібридної силової установки

- положення органу управління потужністю ДВЗ (β_D). Вважатимемо, що величина β_D чисельно дорівнює відношенню дійсної ефективної потужності, що розвивається двигуном, до максимальної ефективної потужності при даній швидкості обертання КВ;
- сигнал управління електромагнітним моментом тягового електродвигуна (β_M), який визначається відношенням необхідного електромагнітного моменту до максимального. Величина β_M задає струм статора електричної машини I_M , чим досягається необхідне значення моменту обертання або моменту опору на валу ротора;
- сигнал управління системою гідравлічного гальмування (β_T), який визначає відношення моменту гальмування ведучих коліс, що задається, до максимального;
- передаточне відношення (γ) трансмісії від ДВЗ до ведучих коліс;
- коефіцієнт включення муфти зчеплення (β_S), який визначається ступенем натиснення на педаль зчеплення: $0 \leq \beta_S \leq 1$.

З точки зору математичного опису динамічних властивостей гібридного автомобіля даний варіант паралельної схеми ГСУ практично не відрізняється від інших відомих варіантів.

З аналізу (рис. 2.1) видно, що існує жорсткий кінематичний зв'язок між ротором електричної машини і ведучими колесами:

$$\omega = \gamma_M^{-1} \cdot \omega_M, \quad (2.22)$$

де γ_M – передаточне відношення трансмісії гібридного автомобіля від ротора електричної машини до ведучих коліс;

ω_M – кутова швидкість обертання ротора електричної машини.

У свою чергу, за відсутності пробуксовування коліс, швидкість автомобіля пов'язана з кутовою швидкістю обертання ведучих коліс виразом:

$$V = \omega \cdot r_{kol}, \quad (2.23)$$

де r_{kol} – радіус кочення ведучого колеса: $r_{kol} = \tilde{r}_{kol} \cdot h_{def}$;

$\tilde{r}_{kol}$ – радіус ведучого колеса;

h_{def} – коефіцієнт деформації колеса.

Розглянемо особливості руху автомобіля з паралельною ГСУ за наявності керуючих і збурюючих впливів.

Відомо, що математична модель руху автомобіля багатоструктурна, тобто такі режими як рух з блокованою, розблокованою і з буксуючою муфтою зчеплення можуть бути описані окремими системами диференціальних рівнянь. Зміна одного структурного стану іншим з формальної точки зору відбувається при зміні кількості узагальнених координат в рівнянні Лагранжа 2-го роду.

При включеному зчепленні і вибраному передавальному відношенні трансмісії у разі прямолінійного руху без пробуксовування коліс силова установка автомобіля і безпосередньо зв'язаний з нею споживач потужності (власне автомобіль) утворюють жорстку механічну систему з одним ступенем свободи. Як узагальнену координату системи виберемо кут повороту провідних коліс φ . Якщо дана система неконсервативна і на неї накладені ідеальні голономні зв'язки, то динаміка такої системи може бути описана за допомогою рівняння Лагранжа другого роду [80 – 85]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \varphi} = Q_\varphi, \quad (2.24)$$

де $\dot{\varphi} = d\varphi/dt = \omega$ – кутова швидкість обертання ведучих коліс;

E_k – кінетична енергія автомобіля;

Q_φ – узагальнена сила, відповідна прикладеним до ведучих коліс автомобіля моментам сил, віднесена до координати φ .

Кінетична енергія автомобіля може бути визначена на підставі теореми Кеніга [86]:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J_{DVS} \cdot \omega_{KV}^2 + \frac{1}{2} \cdot J_{VD} \cdot \omega_M^2 + \frac{1}{2} \cdot m_A \cdot V^2 + E_{k.vm}, \quad (2.25)$$

де J_{DVS} – момент інерції мас, що обертаються, ДВЗ, приведений до осі обертання колінчастого валу;

ω_{KV} – кутова швидкість обертання колінчастого валу ДВЗ. При блокуванні муфти зчеплення $\omega_{KV} = \gamma \cdot \omega$;

J_{VD} – момент інерції ротора електричної машини;

m_A – маса автомобіля;

$E_{k.vm}$ – кінетична енергія різних мас, що обертаються, в автомобілі (колеса і так далі). Цю кінетичну енергію надалі враховуватимемо у вигляді коефіцієнта k_{vm} , який визначає її відношення до кінетичної енергії основної маси автомобіля.

Враховуючи співвідношення між швидкістю обертання ведучих коліс і швидкостями, що входять в рівняння для кінетичної енергії, останній вираз можна переписати у вигляді:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J_{\Sigma.kol} \cdot \omega^2, \quad (2.26)$$

де $J_{\Sigma.kol}$ – сумарний момент інерції мас, що обертаються, приведений до осі обертання ведучих коліс

$$J_{\Sigma.kol} = J_{DVS} \cdot \gamma^2 + J_{VD} \cdot \gamma_M^2 + k_{vm} \cdot m_A \cdot r_{kol}^2. \quad (2.27)$$

Вважатимемо, що приведений момент інерції $J_{\Sigma.kol}$ не залежить від швидкості обертання ведучих коліс, а швидкість обертання коліс не залежить від їх кутового положення. В цьому випадку [88, 90] рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{J_{\Sigma.kol} \cdot \omega^2}{2} \right) &= J_{\Sigma.kol} \cdot \omega; \\ \frac{d}{dt} (J_{\Sigma.kol} \cdot \omega) &= \frac{d J_{\Sigma.kol}}{dt} \cdot \omega + \frac{d \omega}{dt} \cdot J_{\Sigma.kol} = \frac{d J_{\Sigma.kol}}{d \varphi} \cdot \omega^2 + \frac{d \omega}{dt} \cdot J_{\Sigma.kol}; \\ \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{J_{\Sigma.kol} \cdot \omega^2}{2} \right) &= \frac{\partial J_{\Sigma.kol}}{\partial \varphi} \cdot \frac{\omega^2}{2} + J_{\Sigma.kol} \cdot \omega \cdot \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} = \frac{d J_{\Sigma.kol}}{d \varphi} \cdot \frac{\omega^2}{2}.\end{aligned}\quad (2.28)$$

Підставивши набутих значень похідних в рівняння Лагранжа, отримаємо:

$$J_{\Sigma.kol} \cdot \frac{d \omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{d J_{\Sigma.kol}}{d \varphi} = Q_{\varphi}. \quad (2.29)$$

Для знаходження узагальненої сили Q_{φ} , дамо куту φ , віртуальний приріст $\delta \varphi$ і розглянемо суму елементарних робіт на цьому переміщенні моментів сил, прикладених до ведучих коліс [87–89] та отримаємо вираз:

$$\delta A_{\varphi} = \gamma \cdot M_{DVS} \cdot \delta \varphi + \gamma_M \cdot M_{VD} \cdot \delta \varphi - M_{trm} \cdot \delta \varphi - M_{spr} \cdot \delta \varphi - M_{tr} \cdot \delta \varphi, \quad (2.30)$$

де $M_{DVS} = M_{DVS}(\omega_{KV}, \beta_D)$ – ефективний момент ДВЗ;

$M_{VD} = M_{VD}(\omega_M, \beta_M)$ – момент на валу електричної машини;

$M_{trm} = M_{trm}(\beta_T)$ – гальмівний момент системи гідравлічного гальмування;

$M_{spr} = M_{spr}(V, \alpha, \vartheta_0)$ – момент опору, прикладений до ведучих коліс автомобіля;

M_{tr} – момент опору, обумовлений силами тертя в елементах трансмісії, приведений до осі обертання ведучих коліс;

Узагальнена сила визначається із виразу:

$$Q_{\varphi} = \frac{\delta A_{\varphi}}{\delta \varphi} = \gamma \cdot M_{DVS} + \gamma_M \cdot M_{VD} - M_{trm} - M_{spr} - M_{tr}. \quad (2.31)$$

Підставивши вираження для Q_{φ} у рівняння Лагранжа і вважаючи, що значенням $d J_{\Sigma.kol} / d \varphi$ можна знехтувати, отримаємо рівняння динаміки прямолінійного руху системи ГСУ – автомобіль за відсутності пробуксовування коліс і заблокованій муфті зчеплення:

$$J_{\Sigma.kol} \cdot \frac{d \omega}{dt} = \gamma \cdot M_{DVS} + \gamma_M \cdot M_{VD} - M_{trm} - M_{spr} - M_{tr}. \quad (2.32)$$

При русі з розблокованою муфтою зчеплення автомобіль з паралельною ГСУ набуває другого ступню свободи. У якості другої узагальненої координати динамічної системи виберемо кут повороту КВ φ_{KV} . Динамічні властивості прямолінійного руху автомобіля в цьому випадку описуються наступними рівняннями Лагранжа:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \omega} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \varphi} = Q_\varphi \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \omega_{KV}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \varphi_{KV}} = Q_{\varphi.kv} \end{cases}, \quad (2.33)$$

де $Q_{\varphi.kv}$ – узагальнена сила, відповідна узагальненій координаті φ_{KV} .

В даному випадку кінетична енергія автомобіля визначається вираженням:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot (J_{DVS} \cdot \omega_{KV}^2 + J_{\Sigma.kol.s} \cdot \omega^2), \quad (2.34)$$

де $J_{\Sigma.kol.s}$ – сумарний момент інерції мас, що обертаються, приведений до осі обертання ведучих коліс, при вимкненому зчепленні:

$$J_{\Sigma.kol.s} = J_{VD} \cdot \gamma_M^2 + k_{vm} \cdot m_A \cdot r_{kol}^2. \quad (2.35)$$

Відповідні узагальнені сили визначаються виразами:

$$Q_\varphi = \gamma_M \cdot M_{VD} - M_{trm} - M_{spr} - M_{tr.vd}, \quad (2.36)$$

$$Q_{\varphi.kv} = M_{DVS} - M_{tr.dvs}, \quad (2.37)$$

де $M_{tr.vd}$ и $M_{tr.dvs}$ – моменти опору сил тертя в елементах трансмісії електричної машини і ДВЗ відповідно.

Після диференціювання виразу для кінетичної енергії по узагальнених координатах і узагальнених швидкостях записуємо остаточні рівняння динаміки системи ГСУ – автомобіль при розблокованій муфті зчеплення:

$$\begin{cases} J_{\Sigma.kol.s} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \gamma_M \cdot M_{VD} - M_{trm} - M_{spr} - M_{tr.vd} \\ J_{DVS} \cdot \frac{d\omega_{KV}}{dt} = M_{DVS} - M_{tr.dvs} \end{cases}. \quad (2.38)$$

Для опису руху гібридного автомобіля з блокованою муфтою зчеплення вважаємо, що коефіцієнт $\beta_S \in [0, 1]$ характеризує міру буксування фрикційної муфти. При цьому значення $\beta_S = 0$ відповідає руху з розблокованою муфтою зчеплення або на нейтральній передачі, а $\beta_S = 1$ – руху з блокованою муфтою. В цьому випадку динамічні властивості системи ГСУ – автомобіль – дорога можуть бути описані таким чином:

$$\begin{cases} (J_{DVS} \cdot \gamma^2 \cdot \beta_S + J_{\Sigma.kol.s}) \cdot \frac{d\omega}{dt} = \gamma \cdot \beta_S \cdot (M_{DVS} - M_{tr.dvs}) + \gamma_M \cdot M_{VD} - M_{trm} - M_{spr} - M_{tr.vd} \\ J_{DVS} \cdot \frac{d\omega_{KV}}{dt} \cdot (1 - \beta_S) + \omega_{KV} \cdot \beta_S = (M_{DVS} - M_{tr.dvs}) \cdot (1 - \beta_S) + \gamma \cdot \beta_S \cdot \omega \end{cases} \quad (2.39)$$

Очевидно, що значення змінної β_S визначається ступенем натиснення на педаль зчеплення.

2.4 Математичне моделювання гібридної силової установки

Двигун внутрішнього згорання, будучи основним двигуном ГСУ, багато в чому визначає технічний стан її і показники економічності і екологічної безпеки. Для вирішення завдань аналізу, синтезу і оптимізації системи управління ГСУ ключовою є проблема ідентифікації статичних і динамічних характеристик (математичній моделі) ДВЗ.

Під математичною моделлю ДВЗ розумітимемо деякого оператора:

$$\mathbf{F}_{DVS} : \mathbf{U}_{DVS} \mapsto \mathbf{Y}_{DVS}, \quad (2.40)$$

відповідно до якого кожному вхідному вектору відповідає:

$$\mathbf{u}_{DVS} = \begin{bmatrix} \omega_{KV} \\ \dot{\omega}_{KV} \\ \beta_D \\ \dot{\beta}_D \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_{DVS} \in \mathbf{U}_{DVS} \subset \mathbb{R}^4, \quad \forall t; \quad \mathbf{U}_{DVS} = \left[\begin{array}{l} \omega_{KV.min} \leq \omega_{KV} \leq \omega_{KV.max} \\ \dot{\omega}_{KV.min} \leq \dot{\omega}_{KV} \leq \dot{\omega}_{KV.max} \\ 0 \leq \beta_D \leq 1 \\ \dot{\beta}_{D.min} \leq \dot{\beta}_D \leq \dot{\beta}_{D.max} \end{array} \right], \quad (2.41)$$

ставиться у відповідність вихідний вектор:

$$\mathbf{y}_{DVS} = \begin{bmatrix} M_{DVS} \\ G_T \\ C_{NOx} \\ C_{CO} \\ C_{HC} \end{bmatrix}, \mathbf{y}_{DVS} \in \mathbf{Y}_{DVS} \subset \mathbb{R}^5, \forall t; \mathbf{Y}_{DVS} = \begin{bmatrix} M_{DVS.min} \leq M_{DVS} \leq M_{DVS.max} \\ 0 \leq G_T \leq G_{T.max} \\ 0 \leq C_{NOx} \leq C_{NOx.max} \\ 0 \leq C_{CO} \leq C_{CO.max} \\ 0 \leq C_{HC} \leq C_{HC.max} \end{bmatrix}, \quad (2.42)$$

тобто:

$$\mathbf{y}_{DVS} = \mathbf{F}_{DVS}(\mathbf{u}_{DVS}), \quad (2.43)$$

де $\dot{\omega}_{KV} = d\omega_{KV}/dt$; $\dot{\beta}_D = d\beta_D/dt$; $\omega_{KV.min}$, $\omega_{KV.max}$, $\dot{\omega}_{KV.min}$, $\dot{\omega}_{KV.max}$ – мінімально і максимально допустимі швидкості обертання і прискорення КВ відповідно; $\dot{\beta}_{D.min}$, $\dot{\beta}_{D.max}$ – мінімально і максимально можливі швидкості сигналу, що управляє, ДВЗ; $M_{DVS.min}$, $M_{DVS.max}$ – мінімальне і максимальне значення ефективного моменту ДВЗ, які є функціями швидкості обертання КВ; $G_{T.max}$ – максимально можлива годинна витрата пального; $C_{NOx.max}$, $C_{CO.max}$, $C_{HC.max}$ – максимальна годинна емісія оксидів азоту, оксиду вуглецю і вуглеводнів відповідно.

Оператор моделі $\mathbf{F}_{DVS}$ має бути в певному значенні щонайкраще наближений до невідомого оператора об'єкту $\mathbf{F}_{DVS}^*$. Близькість операторів оцінюватимемо виключно по близькості їх реакцій на одну і ту ж вхідну дію. Процес ідентифікації математичної моделі полягає у визначенні структури $\mathbf{\Omega}_{DVS}$ оператора $\mathbf{F}_{DVS}$ і вектору невідомих параметрів моделі $\mathbf{P}_{DVS}$ [88]

$$\mathbf{F}_{DVS} = \langle \mathbf{\Omega}_{DVS}, \mathbf{P}_{DVS} \rangle. \quad (2.44)$$

Отримана в результаті ідентифікації математична модель повинна задовольняти ряду вимог:

- вихід моделі винен максимально точно, згідно вибраній метриці, відповідати характеристикам ДВЗ, що належать області допустимих експлуатаційних режимів, при одних і тих же вхідних сигналах;

- рівень складності моделі має бути прийнятним з погляду її використання при вирішенні оптимізаційної задачі;

– математичні перетворення, використовувані при побудові моделі, повинні допускати ефективну реалізацію засобами системи комп'ютерної математики MATLAB.

Процес ідентифікації повинен спиратися на експериментально отримані швидкісні і навантажувальні характеристики ДВЗ, забезпечувати простоту налаштування моделі на конкретний тип двигуна, мати достатню перешкодозахищеність, бути автоматичним або автоматизованим.

Математичні моделі ДВЗ у вигляді систем диференціальних рівнянь, отриманих на основі аналізу термодинамічних процесів в камері згорання, впускному і випускному колекторах, особливостей взаємодії систем сумішоутворення і запалювання, кінематичних зв'язків між різними вузлами і агрегатами і так далі виявляються надзвичайно складними і громіздкими [77, 89, 90]. Лінеаризація даних рівнянь [81– 84] призводить до суттєвого зростання нев'язок виходів моделі і об'єкту при необхідності використовувати модель в широкому діапазоні експлуатаційних режимів ДВЗ:

$$\begin{cases} \mathbf{N}_{21} = 2 : \left(1 + \exp \left(-2 \cdot \left(\mathbf{W}_{21} \cdot \left[\bar{\omega}_{KV}, \bar{M}_{DVS} \right]^T + \mathbf{B}_{21} \right) \right) \right) - 1 \\ \mathbf{N}_{22} = 2 : \left(1 + \exp \left(-2 \cdot \left(\mathbf{W}_{22} \cdot \mathbf{N}_{21} + \mathbf{B}_{22} \right) \right) \right) - 1 \\ \left[\bar{C}_{NOx}, \bar{C}_{CO}, \bar{C}_{HC} \right]^T = \mathbf{W}_{23} \cdot \mathbf{N}_{22} + \mathbf{B}_{23} \end{cases}, \quad (2.45)$$

де $\mathbf{N}_{2i}$ – вектори виходів нейронів i -го шару, $i = 1, 2$;

$\mathbf{W}_{2i}$ – матриці вагових коефіцієнтів нейронів i -го шару, $i = \overline{1, 3}$;

$\mathbf{B}_{2i}$ – вектори зсувів нейронів i -го шару, $i = \overline{1, 3}$;

Денормування вихідного сигналу нейронної мережі здійснюється згідно виразу:

$$\begin{bmatrix} C_{NOx} \\ C_{CO} \\ C_{HC} \end{bmatrix} = 0,5 \cdot \left(\begin{bmatrix} \max \{ C_{NOx} \} \\ \max \{ C_{CO} \} \\ \max \{ C_{HC} \} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \min \{ C_{NOx} \} \\ \min \{ C_{CO} \} \\ \min \{ C_{HC} \} \end{bmatrix} \right) * \left(\begin{bmatrix} \bar{C}_{NOx} \\ \bar{C}_{CO} \\ \bar{C}_{HC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} \min \{ C_{NOx} \} \\ \min \{ C_{CO} \} \\ \min \{ C_{HC} \} \end{bmatrix}, \quad (2.46)$$

де $\min\{C_{NOx}\}$, $\min\{C_{CO}\}$, $\min\{C_{HC}\}$, $\max\{C_{NOx}\}$, $\max\{C_{CO}\}$, $\max\{C_{HC}\}$ – відповідно мінімальні і максимальні значення множин $\{C_{NOx.i}\}$, $\{C_{CO.i}\}$ і $\{C_{HC.i}\}$, $i = \overline{1, N_{ex.2}}$.

Регулювальна характеристика вибраного двигуна, відповідно до якої відбувається обмеження максимальних оборотів КВ при низькому навантаженні, моделюється за допомогою відображення $\mathbf{F}_{DVS.3}$

$$M_{DVS}(\tilde{M}_{DVS}, \omega_{KV}) = \min(\tilde{M}_{DVS}, M_{DVS.p}(\omega_{KV})),$$

$$M_{DVS.p}(\omega_{KV}) = k_{DVS.p1} \cdot \omega_{KV} + k_{DVS.p0} \quad (2.47)$$

де $k_{DVS.p0}$, $k_{DVS.p1}$ – параметри регулювальної характеристики ДВЗ.

Тепер задача структурної ідентифікації моделі ДВС може мати параметри, тобто різні структури можуть кодуватися вектором структурних параметрів $\mathbf{D}_{DVS}$

$$\mathbf{F}_{DVS} = \langle \mathbf{D}_{DVS}, \mathbf{P}_{DVS} \rangle \quad (2.48)$$

В даному випадку елементами вектору $\mathbf{D}_{DVS}$ є кількості нейронів в прихованих шарах ШНМ $\mathbf{F}_{DVS.1}$ і $\mathbf{F}_{DVS.2}$, які визначають розмірності відповідних матриць вагових коефіцієнтів і зміщень нейронів $\mathbf{D}_{DVS} = \langle \mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{D}_{DVS.2} \rangle$ [5,7]. У свою чергу, елементами вектору $\mathbf{P}_{DVS}$ невідомих параметрів моделі є елементи матриць вагових коефіцієнтів і зміщень нейронів ШНМ $\mathbf{F}_{DVS.1}$ і $\mathbf{F}_{DVS.2}$, а також параметри регулювальної характеристики $k_{DVS.p0}$ і $k_{DVS.p1}$: $\mathbf{P}_{DVS} = \langle \mathbf{P}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.2}, \mathbf{P}_{DVS.3} \rangle$.

Вважатимемо, що в результаті діагностування ДВЗ була отримана множина точок $\{M_{DVS.i}, \omega_{KV.i}, \beta_{D.i}\}$, $\{G_{T.i}, \omega_{KV.i}, \beta_{D.i}\}$, $i = \overline{1, N_{ex.1}}$ і $\{C_{NOx.j}, M_{DVS.j}, \omega_{KV.j}\}$, $\{C_{CO.j}, M_{DVS.j}, \omega_{KV.j}\}$, $\{C_{HC.j}, M_{DVS.j}, \omega_{KV.j}\}$, $j = \overline{1, N_{ex.2}}$, які є репрезентативною вибіркою нормативних даних і достатньо точно відображають поведінку швидкісних характеристик ДВЗ, показників його економічності і токсичності ВГ при $\omega_{KV} \in [\omega_{KV.min}, \omega_{KV.max}]$, $\beta_D \in [0, 1]$.

Для нейронної мережі $\mathbf{F}_{DVS.1} = \langle \mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.1} \rangle$ функція нев'язку виходів моделі і об'єкту $\psi_{DVS.1}$ в i -й точці експериментальних характеристик може бути визначена таким чином:

$$\begin{cases} \psi_{DVS.1}(i, \mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.1}) = (M_{DVS.i} - y_{11})^2 + (G_{T.i} - y_{12})^2 \\ [y_{11}, y_{12}]^T = \mathbf{F}_{DVS.1}(\omega_{KV.i}, \beta_{D.i}, \mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.1}) \end{cases} \quad (2.49)$$

Задача параметричної ідентифікації нейронної мережі $\mathbf{F}_{DVS.1}$ може бути зведена до задачі пошуку мінімуму цільового функціонала вигляду:

$$J_{DVS.1}(\mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.1}) = \frac{1}{N_{ex.1}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{ex.1}} \psi_{DVS.1}(i, \mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.1}) \rightarrow \min. \quad (2.50)$$

Для нейронної мережі $\mathbf{F}_{DVS.2}$ відповідно можна записати:

$$\begin{cases} \psi_{DVS.2}(j, \mathbf{D}_{DVS.2}, \mathbf{P}_{DVS.2}) = (C_{NOx.j} - y_{21})^2 + (C_{CO.j} - y_{22})^2 + (C_{HC.j} - y_{23})^2 \\ [y_{21}, y_{22}, y_{23}]^T = \mathbf{F}_{DVS.2}(\omega_{KV.j}, M_{DVS.j}, \mathbf{D}_{DVS.2}, \mathbf{P}_{DVS.2}) \end{cases}; \quad (2.51)$$

$$J_{DVS.2}(\mathbf{D}_{DVS.2}, \mathbf{P}_{DVS.2}) = \frac{1}{N_{ex.2}} \cdot \sum_{j=1}^{N_{ex.2}} \psi_{DVS.2}(j, \mathbf{D}_{DVS.2}, \mathbf{P}_{DVS.2}) \rightarrow \min. \quad (2.52)$$

Якщо параметри $\mathbf{P}_{DVS.3} = [k_{p0}, k_{p1}]^T$ регулювальної характеристики $\mathbf{F}_{DVS.3}$ задані, ідентифікація математичної моделі ДВЗ зводиться до визначення структури і параметрів нейронних мереж $\mathbf{F}_{DVS.1}$ и $\mathbf{F}_{DVS.2}$

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{D}_{DVS}, \mathbf{P}_{DVS} \rangle &= \langle [\mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{D}_{DVS.2}], [\mathbf{P}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.2}, \mathbf{P}_{DVS.3}] \rangle = \\ &= \begin{cases} \arg \min_{\mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.1}} J_{DVS.1}(\mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.1}) \\ \arg \min_{\mathbf{D}_{DVS.2}, \mathbf{P}_{DVS.2}} J_{DVS.2}(\mathbf{D}_{DVS.2}, \mathbf{P}_{DVS.2}) \end{cases} \end{aligned} \quad (2.53)$$

Для вирішення ідентифікаційної задачі можуть бути використані відомі методи навчання нейронних мереж [97 – 100, 104 – 106]. Одним з таких методів, який показав свою високу ефективність при рішенні даної задачі, є алгоритм SCG (англомовне скорочення scaled conjugate gradient algorithm, що асоціюється з назвою даного алгоритму в ППП Neural Network Toolbox), запропонований Моллером (Moller) [80, 82]. Цей алгоритм об'єднує ідеї методу зв'язаних

градієнтів з квазініютоновими методами, і, зокрема, використовує підхід, реалізований в алгоритмі LM (Levenberg-Marquardt optimization) Льовенберга, – Марквардта [81, 85]. Алгоритм SCG може зажадати більшого числа ітерацій, чим інші алгоритми методу зв'язаних градієнтів, але при цьому кількість обчислень на кожній ітерації істотно скорочена.

Одна з найбільш серйозних труднощів, що виникають при навчанні ШНМ, пов'язана з явищем перенавчання (overfitting). Воно полягає в тому, що при мінімізації вибраного функціонала мережа мінімізує помилку на деякій обмеженій навчальній множині, що може привести до нестійкості результатів поза даною множиною. При цьому здібність мережі до узагальнення накопичених знань на вхідні сигнали, що не належать навчальній множині, на певному етапі навчання перестає зростати і навіть може погіршуватися [3,5].

У приведеному випадку [100] затверджується, що перенавчання може наступити у тому випадку, коли кількість точок множини, на якій проводиться навчання нейронної мережі $N_{ex.i} < 30 \cdot k_{INS.p}$, де $k_{INS.p}$ – кількість вільних параметрів мережі. Разом з тим необхідно враховувати, що окрім структури ШНМ і об'єму навчальної множини, на ефект перенавчання впливає також характер залежності, що апроксимується, і розподіл точок навчальної множини.

Методика оцінки помилки узагальнення, що базується на використанні міри Вапника-Червоненкиса, яка відображає рівень складності ШНМ і тісно пов'язана з кількістю синаптичних зв'язків, що містяться в ній, викладена в [79, 80]. Однак сьогодні метод точного визначення міри Вапника-Червоненкиса не відомий, що утрудняє оцінку помилки узагальнення з метою управління навчанням мережі.

Для подолання ефекту перенавчання множина вихідних даних може бути розділена на дві підмножини: навчальну (training set) і контрольну (validation set). Навчання мережі здійснюється з використанням навчальної підмножини. Контрольна підмножина використовується тільки для контролю помилки навчання. На початковій фазі навчання помилка для контрольної підмножини зменшується так само, як і для навчальної підмножини [7,12]. На певному етапі

зменшення помилки для контрольної підмножини припиняється або вона починала зростати. У цей момент необхідно переривати процедуру навчання для запобігання явищу перенавчання.

Якщо помилка для контрольної підмножини значно перевищує помилку для навчальної підмножини можна зробити висновок, що вихідні дані непоказні, тобто недостатньо точно відображають поведінку характеристик ДВЗ.

Для розподілу множини вихідних даних на навчальну і контрольну підмножини в [80] запропоновано використовувати коефіцієнт розбиття $k_{rzb} \in [0,1]$:

$$k_{rzb} = \frac{\sqrt{2 \cdot k_{INS.p} - 1} - 1}{2 \cdot (k_{INS.p} - 1)}. \quad (2.54)$$

Кількість точок, що виділяються в навчальну підмножину, визначається із співвідношення $N_{ex.trn} = (1 - k_{rzb}) \cdot N_{ex}$, де N_{ex} – загальна кількість експериментально отриманих точок, що належать характеристиці, яка апроксимується. Кількість точок, що виділяються в контрольну підмножину: $N_{ex.vld} = k_{rzb} \cdot N_{ex}$. Вибір k_{rzb} істотно впливає на ефективність навчання нейронної мережі тільки у разі високої складності характеристики, що апроксимується, при невеликому розмірі навчальної множини. Із збільшенням складності характеристики оптимальне значення k_{rzb} має тенденцію до зменшення [6, 15].

Основною вимогою до допоміжного електродвигуна ГСУ, як і до інших тягових електроприводів, є його стійка і ефективна робота у всьому діапазоні тягово-швидкісних режимів, що задаються, за умови обмеження споживаної потужності можливостями акумуляторної батареї і тягової мережі. Окрім цього двигун має бути оборотною електричною машиною і забезпечувати рекуперацію енергії гальмування ТЗ при роботі в генераторному режимі.

До недавнього часу в тяговому електроприводі найширше застосовувалися двигуни постійного струму (ДПС). Основними перевагами ДПС є простота реалізації процесу регулювання швидкості і можливість безпосереднього підключення до автономного джерела електроживлення – акумуляторної батареї.

Успіхи в області силової електроніки і мікропроцесорної техніки створили сприятливі умови для розробки і виробництва тягових електроприводів нового покоління на базі вентильних двигунів. Саме такі електроприводи в даний час найчастіше застосовуються як допоміжний двигун ГСУ [32].

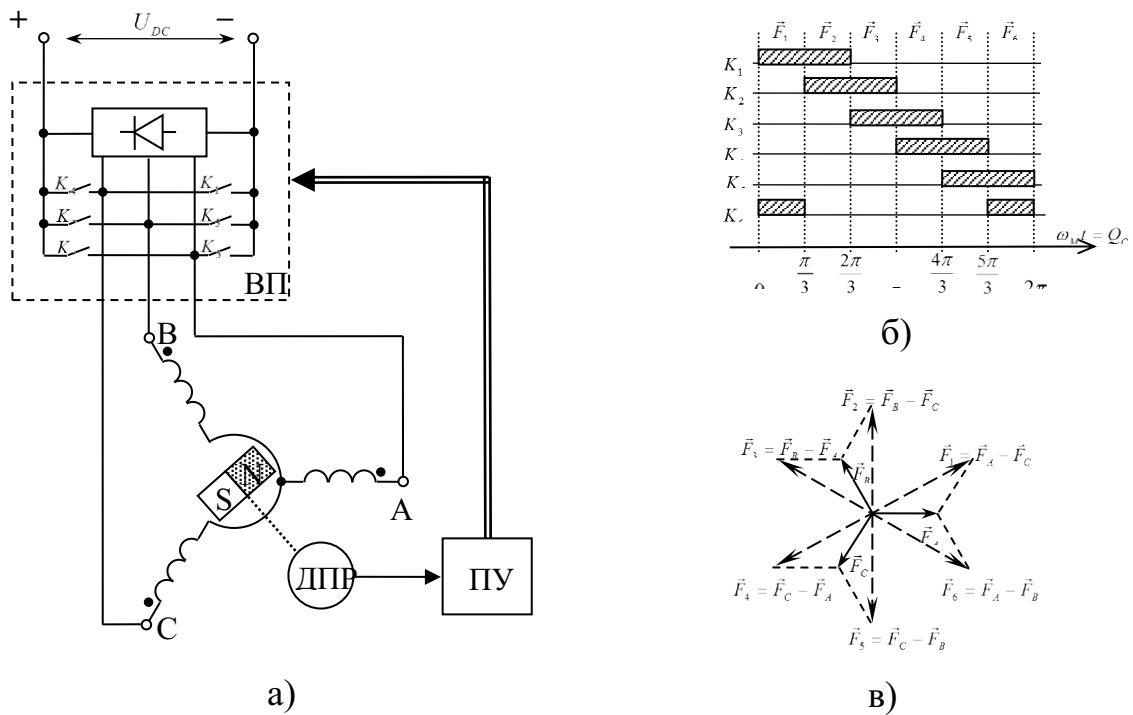
Вентильний електродвигун (ВЕД) є системою регульованого електроприводу, що складається з електродвигуна змінного струму, конструктивно подібного до синхронної машини, вентильного перетворювача (ВП) і пристрою управління (ПУ), що забезпечують комутацію кіл обмоток статора залежно від кутового положення ротора.

Як тяговий електропривод застосовуються ВЕД на основі синхронного двигуна із збудженням від розташованих на роторі постійних магнітів (СДПМ) [89–91].

Використання ВП і ПУ, що виконують функцію щітково-колекторного вузла, наділяє ВЕД властивості безколекторного ДПС і дозволяє використовувати прості структури управління електроприводу постійного струму. Основними конструктивними і техніко-експлуатаційними перевагами ВЕД є:

- безконтактність і відсутність вузлів, що вимагають обслуговування;
- велика перевантажувальна здатність по моменту;
- малий момент інерції ротора, висока швидкодія;
- висока статична точність і великий можливий діапазон регулювання швидкості;
- найвищі енергетичні показники через відсутність втрат на збудження (ККД більше 90 %);
- можливість використання у вибухонебезпечному і агресивному середовищі;
- простота системи охолодження через відсутність на роторі обмоток, що нагріваються струмом навантаження;
- великий термін служби, надійність;
- в порівнянні з ДПС кращі масо габаритні і вартісні показники.

Функціональна схема ВЕД на основі СДПМ приведена на (рис.2.4-а). Обмотки статора отримують живлення від джерела постійного струму U_{DC} через мостовий комутатор вентильного перетворювача ВП з шістьма керованими напівпровідниковими ключами $K_1 - K_6$ [41]. Діодний міст із зворотною, відносно напруги живлення, полярністю включення діодів, що входить до складу ВП, створює контури для спаду струму в обмотках при відключенні відповідних ключів. Нумерація ключів відповідає черговості їх комутації (рис.2.4-б) з кутовим інтервалом 60 електричних градусів (ел. град). Для спрощення розгляду прийнято, що число пар полюсів дорівнює одиниці, що дозволяє не розрізняти фізичний і електричний простори ($1 \text{ ел. град} = 1^\circ$).



а – схема включення; б – часова діаграма комутації ключів вентильного перетворювача; в – просторова діаграма вектора результуючої сили, що намагнічує, обмоток статора

Рисунок 2.4 – Вентильний електродвигун на основі СДПМ

Комутація струмів в обмотках статора приводить до зміни просторового положення вектору результуючої магніторушійної сили $\vec{F}$. Вектор $\vec{F}$ визначається як геометрична сума векторів магніторушійних сил (МРС) двох

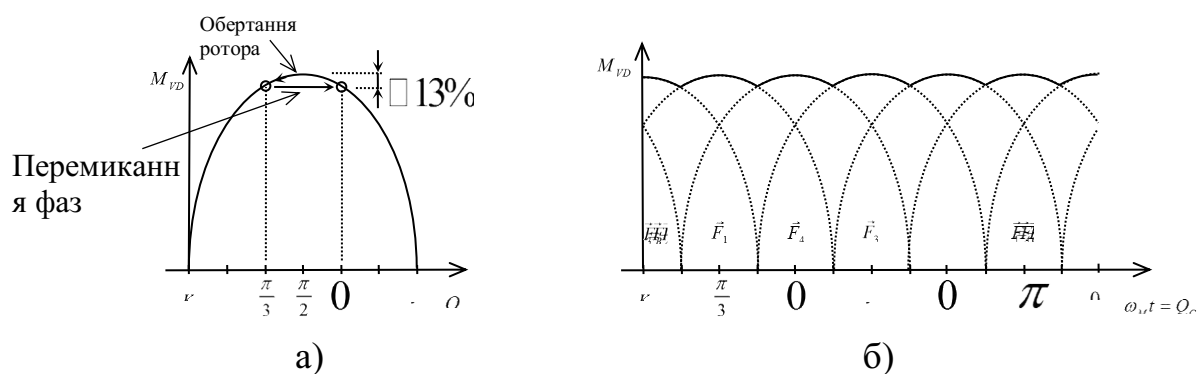
фаз, що обтикаються струмом в кожен момент часу, з урахуванням напрямку струму відносно початку і кінця обмотки (див. рис.2.4-в).

З датчика положення ротора ДПР в пристрій управління ПУ поступає інформація про поточне кутове положення ротора щодо обмоток статора. На підставі цієї інформації ПУ здійснює управління ключами $K_1 - K_6$ таким чином, щоб кут Q між векторами результуючої МРС $\vec{F}$ і магнітного потоку ротора $\vec{\Phi}$ перебував в діапазоні $Q = \left[\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3} \right]$. При цьому середній кут розузгодження $Q_{md} = \pi/2$.

Електромагнітний момент, що розвивається двигуном M_{VD} визначається взаємодією двох потоків: статора, що створюється струмом в обмотках статора, і ротора, що створюється постійними магнітами:

$$M_{VD} = \frac{3}{2} |\vec{F}| |\vec{\Phi}| \sin Q. \quad (2.55)$$

На рис.2.5-а приведена залежність електромагнітного моменту СДПМ від кута Q [92]. Під дією електромагнітного моменту ротор двигуна повертається, і кут Q зменшується. Характер залежності електромагнітного моменту від кута повороту ротора Q_C (рис.2.5-б).



(а) – вентильного двигуна від кута між векторами потоків статора і ротора

(б) – від кутового положення ротора

Рисунок 2.5 – Залежність електромагнітного моменту

При визначенні кута Q_C за початок відліку узятий напрям вектора МРС фази А при підключенні початку обмотки до позитивного полюса джерела живлення (рис.2.6).

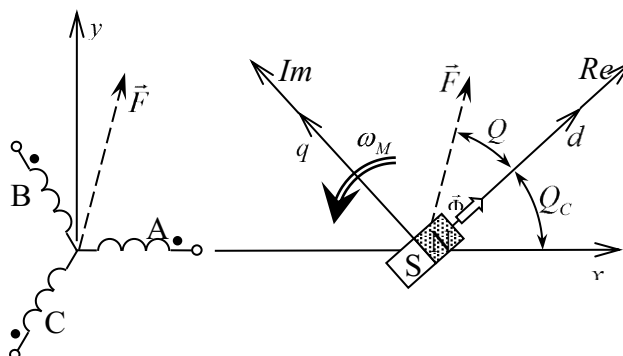


Рисунок 2.6 – Взаємозв'язок нерухомих систем координат СДПМ і систем координат, що обертаються

Наявність пульсацій моменту і пов'язана з цим нерівномірність обертання ротора є одним з недоліків ВЕД. Нерівномірність обертання ротора залежить від числа пар полюсів двигуна і приведенного моменту інерції приводу. Цей недолік може бути усунений переходом до синусоїдальної форми струму в обмотках статора. Частота цього струму, так само як і в розглянутій схемі, повинна визначатися сигналами ДПР.

Управління електромагнітним моментом і частотою обертання ротора ВЕД проводиться методом широтно-імпульсного регулювання. Змінюючи шпаруватість імпульсів управління ключами $K_1 - K_6$ у періоди їх включеного стану, можна регулювати середню величину напруги, що підводиться до обмоток статора двигуна, а, отже, і величину результуючої МДС $|\vec{F}|$.

Для здійснення режиму гальмування алгоритм управління ВП має бути змінений так, щоб результуючий вектор МДС статора відставав від вектору магнітного потоку ротора. Для забезпечення можливості рекуперації енергії гальмування до складу ВП замість діодного моста повинен входити керований випрямляч [51, 56].

Розглянемо систему координат (d, q) пов'язану з ротором ВЕД і нерухому відносно його. Вважатимемо, що вісь d суміщена з віссю магнітного потоку ротора [72, 75].

Взаємозв'язок системи координат, що обертається (d, q) і нерухомої (x, y) системи координат розглянемо на прикладі просторового вектора МДС $\vec{F}$ який випереджає вектор магнітного потоку ротора $\vec{\Phi}$ на кут Q (див. рис.2.6).

У нерухомій системі координат вектор МДС може бути представлений у алгебраїчній і показовій формі:

$$\vec{F}_{xy} = F_x + j \cdot F_y = F_{\max} \cdot (\cos(Q + Q_C) + j \cdot \sin(Q + Q_C)) = F_{\max} \cdot e^{j(Q+Q_C)}. \quad (2.56)$$

Аналогічно, в системі координат, що обертається (d, q) вважаючи вісь d речовою віссю площини комплексного змінного, той же вектор можна представити у вигляді:

$$\vec{F}_{dq} = F_d + j \cdot F_q = F_{\max} \cdot (\cos(Q) + j \cdot \sin(Q)) = F_{\max} \cdot e^{jQ}, \quad (2.57)$$

де F_x, F_y, F_d, F_q – проекції вектору $\vec{F}$ на відповідні осі; $F_{\max}$ – амплітуда МДС.

Порівнюючи приведені вирази, можна одержувати формулу для перерахунку величин із нерухомої системи координат в ту, що обертається:

$$\vec{F}_{xy} = \vec{F}_{dq} \cdot e^{-jQ} \cdot e^{j(Q+Q_C)} = \vec{F}_{dq} \cdot e^{jQ_C}. \quad (2.58)$$

Застосувавши дану формулу до векторів $\vec{u}_{xy}, \vec{i}_{xy}$ і $\vec{\psi}_{xy}$, отримаємо рівняння для електромагнітних процесів ВЕД в системі координат, що обертається:

$$\begin{cases} \vec{u}_{dq} \cdot e^{jQ_C} = R_1 \cdot \vec{i}_{dq} \cdot e^{jQ_C} + \frac{d}{dt}(\vec{\psi}_{dq} \cdot e^{jQ_C}) \\ \vec{\psi}_{dq} \cdot e^{jQ_C} = L_1 \cdot \vec{i}_{dq} \cdot e^{jQ_C} + \psi_{mag} \cdot e^{jQ_C} \end{cases}, \quad (2.59)$$

$$\frac{d}{dt}(\vec{\psi}_{dq} \cdot e^{jQ_C}) = \frac{d\vec{\psi}_{dq}}{dt} \cdot e^{jQ_C} + j \cdot \vec{\psi}_{dq} \cdot p_p \cdot \omega_M \cdot e^{jQ_C}, \quad (2.60)$$

враховуючи, що $Q_C = p_p \cdot \omega_M \cdot t$.

Після скорочення лівої і правої частини даних рівнянь на e^{jQ_C} отримаємо вираз:

$$\begin{cases} \vec{u}_{dq} = R_1 \cdot \vec{i}_{dq} + \frac{d\vec{\psi}_{dq}}{dt} + j \cdot p_p \cdot \omega_M \cdot \vec{\psi}_{dq} \\ \vec{\psi}_{dq} = L_1 \cdot \vec{i}_{dq} + \vec{\psi}_{mag} \end{cases} \quad (2.61)$$

Представимо просторові вектори, що входять в дані рівняння, через їх проекції на осі координат [18, 24]:

$$\vec{u}_{dq} = u_d + j u_q; \quad \vec{i}_{dq} = i_d + j i_q; \quad \vec{\psi}_{dq} = \psi_d + j \psi_q. \quad (2.62)$$

В цьому випадку можна записати:

$$\begin{cases} u_d + j u_q = R_1 \cdot i_d + j R_1 \cdot i_q + \frac{d\psi_d}{dt} + j \frac{d\psi_q}{dt} + j p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_d - p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_q, \\ \psi_d + j \psi_q = L_{1d} \cdot i_d + j L_{1q} \cdot i_q + \psi_{mag,d} + j \psi_{mag,q} \end{cases} \quad (2.63)$$

де L_{1d} і L_{1q} – повні індуктивності обмоток статора по подовжній і поперечній осях.

Якщо СДПМ виконаний із неявно полюсним ротором, $L_{1d} = L_{1q} = L_1$; $\psi_{mag,d}$ та $\psi_{mag,q}$ – проекції вектору потокозчеплення статора від магнітного потоку ротора на осі координат. Оскільки вісь d суміщена з віссю магнітного потоку ротора – $\psi_{mag,d} = \psi_{mag}$; $\psi_{mag,q} = 0$.

Розділивши дійсні і уявні частини рівнянь, отримаємо скалярний опис ВЕД:

$$\begin{cases} u_d = R_1 \cdot i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_q \\ \psi_d = L_{1d} \cdot i_d + \psi_{mag} \\ u_q = R_1 \cdot i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_d \\ \psi_q = L_{1q} \cdot i_q \end{cases}, \quad (2.64)$$

або

$$\begin{cases} u_d = R_1 \cdot i_d + L_{1d} \cdot \frac{di_d}{dt} - p_p \cdot \omega_M \cdot L_{1q} \cdot i_q \\ u_q = R_1 \cdot i_q + L_{1q} \cdot \frac{di_q}{dt} + p_p \cdot \omega_M \cdot L_{1d} \cdot i_d + p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_{mag} \end{cases}. \quad (2.65)$$

Потужність, споживану ВЕД, можна визначити як суму миттєвих потужностей фаз статора [35]:

$$P_{ptr} = u_A \cdot i_A + u_B \cdot i_B + u_C \cdot i_C. \quad (2.66)$$

Оскільки миттєві значення фазних струмів і напруги можуть бути записані в нерухомій системі координат:

$$\vec{u}_{xy} = \mathbf{a} \cdot [u_A \quad u_B \quad u_C]^T = \frac{2}{3} \left(u_A - \frac{1}{2}(u_B + u_C) + j \frac{\sqrt{3}}{2}(u_B - u_C) \right) = u_x + j u_y; \quad (2.67)$$

$$\vec{i}_{xy} = \mathbf{a} \cdot [i_A \quad i_B \quad i_C]^T = \frac{2}{3} \left(i_A - \frac{1}{2}(i_B + i_C) + j \frac{\sqrt{3}}{2}(i_B - i_C) \right) = i_x + j i_y, \quad (2.68)$$

звідки:

$$\begin{aligned} u_A &= u_x; & i_A &= i_x; \\ u_B &= -\frac{1}{2}(u_x - \sqrt{3} \cdot u_y); & i_B &= -\frac{1}{2}(i_x - \sqrt{3} \cdot i_y); \\ u_C &= -\frac{1}{2}(u_x + \sqrt{3} \cdot u_y); & i_C &= -\frac{1}{2}(i_x + \sqrt{3} \cdot i_y), \end{aligned} \quad (2.69)$$

підставивши їх у вираз для споживаної потужності, запишемо:

$$P_{ptr} = u_x \cdot i_x + \frac{1}{4}(u_x - \sqrt{3} \cdot u_y)(i_x - \sqrt{3} \cdot i_y) + \frac{1}{4}(u_x + \sqrt{3} \cdot u_y)(i_x + \sqrt{3} \cdot i_y) = \frac{3}{2}(u_x \cdot i_x + u_y \cdot i_y). \quad (2.70)$$

Величина P_{ptr} при заданих значеннях модулів векторів струму і напруги визначається тільки взаємним розташуванням цих векторів і не залежить від вибору системи координат. Отже, можна записати:

$$P_{ptr} = \frac{3}{2}(u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q). \quad (2.71)$$

Підставивши в дану формулу вирази для u_d і u_q отримаємо:

$$P_{ptr} = \frac{3}{2} \left(R_1 \cdot (i_d^2 + i_q^2) + \frac{d\psi_d}{dt} \cdot i_d + \frac{d\psi_q}{dt} \cdot i_q + p_p \cdot \omega_M \cdot (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) \right). \quad (2.72)$$

У цьому виразі можна виділити три складові:

$$P_{CU} = \frac{3}{2} \cdot R_1 \cdot (i_d^2 + i_q^2) \quad (2.73)$$

– потужність активних втрат в міді статора ВЕД;

$$P_{MG} = \frac{3}{2} \left(\frac{d\psi_d}{dt} \cdot i_d + \frac{d\psi_q}{dt} \cdot i_q \right) \quad (2.74)$$

– складова потужності, що характеризує приріст електромагнітної енергії, що запасасться в обмотках статора;

$$P_{EM} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot \omega_M \cdot (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) \quad (2.75)$$

– електромагнітна потужність.

Момент обертання ВЕД можна виразити через електромагнітну потужність і кутову швидкість обертання ротора [50 – 53]:

$$M_{VD} = \frac{P_{EM}}{\omega_M} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (\psi_{mag} + i_d \cdot (L_{1d} - L_{1q})) \cdot i_q. \quad (2.76)$$

Якщо СДПМ виконаний з неявно полюсним ротором, коли $L_{1d} = L_{1q}$ отримаємо:

$$M_{VD} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot \psi_{mag} \cdot i_q. \quad (2.77)$$

Розглянемо режим роботи ВЕД, при якому струми i_d і i_q залишаються постійними або міняються достатньо повільно ($di_d/dt = 0$; $di_q/dt = 0$). В цьому випадку можна записати:

$$\begin{cases} u_d = R_1 \cdot i_d - p_p \cdot \omega_M \cdot L_{1q} \cdot i_q \\ u_q = R_1 \cdot i_q + p_p \cdot \omega_M \cdot L_{1d} \cdot i_d + p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_{mag} \\ M_{VD} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (\psi_{mag} + i_d \cdot (L_{1d} - L_{1q})) \cdot i_q \end{cases} \quad (2.78)$$

При $L_{1d} = L_{1q}$ електромагнітний момент двигуна однозначно визначається складовою струму i_q . Отже, найбільш економічним режимом роботи ВЕД є такий, при якому забезпечується рівність нулю струму i_d що відповідає найменшому значенню струму, споживаного при даному навантаженні [75, 76].

Якщо ВЕД має явно виражені полюси, індуктивності обмотки статора по подовжній і поперечній вісях різні. В цьому випадку момент обертання ВЕД

залежить від обох складових струму, а модуль вектору струму статора (повний струм споживання ВЕД) визначається виразом:

$$I_M = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} = \sqrt{i_d^2 + \left(\frac{2 \cdot M_{VD}}{3 \cdot p_p} \right)^2 \cdot \frac{1}{\left(\psi_{mag} + i_d \cdot (L_{1d} - L_{1q}) \right)^2}}. \quad (2.79)$$

Значення складових i_q^* і i_d^* що забезпечують мінімальний струм споживання ВЕД при заданому навантаженні, можуть бути отримані з умови:

$$\begin{cases} i_d^* = \arg \min_{i_d \in [-I_{\max}, 0]} (I_M(i_d, M_{VD})) \\ I_M^* = I_M(i_d^*, M_{VD}) \\ i_q^* = \sqrt{(I_M^*)^2 - (i_d^*)^2} \end{cases}, \quad M_{VD} = const. \quad (2.80)$$

Окрім мінімізації повного струму статора ВЕД можливі і інші критерії оптимальності при визначенні подовжньою і поперечною складових струму. Деякі з них розглянуті в [71].

Область допустимих режимів роботи ВЕД обмежена співвідношеннями:

$$\sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{\max}; \quad \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \leq U_{\max}, \quad (2.81)$$

де $I_{\max}$ – максимально-допустимий струм фази, обумовлений особливостями ВП або тепловими обмеженнями;

$U_{\max}$ – максимально-допустима напруга фази $U_{\max} = \frac{U_{DC}}{\sqrt{3}}$;

U_{DC} – постійна напруга тягової бортової мережі.

На високих швидкостях обертання ротора ВЕД для задоволення обмеженням області допустимих режимів часто виявляється необхідним використовувати, так званий, режим «ослаблення поля». Даний режим припускає збільшення негативної складової вектору струму i_d з метою компенсації ЕРС обертання $E = \omega_e \psi_{mag}$ за допомогою складової напруги статора $\omega_e L_{1d} i_d$ [72].

Таким чином, в загальному випадку $[i_d^*, i_q^*] = f(M_{VD}, \omega_M)$

Перспективними для використання в тяговому електроприводі вважаються акумулятори на основі літію (літій-іонні, літій-полімерні і т.д.). Номінальна ємність ЕРС акумулятора літій-іонних батареї становить $E_{AK} = 3,5$ В при дуже низькому внутрішньому опорі. Саморозряд таких ТАБ становить близько 10 % на місяць. Час повного заряду становить 2...3 год. Широке впровадження літій-іонних ТАБ в даний час стримує висока вартість і ряд невирішених технологічних проблем [58].

В процесі функціонування тягового електроприводу електронний блок управління забезпечує підтримання ступеня зарядженості ТАБ ($\theta_{ТАБ} = C_{ТАБ}/C_{ТАБ.ном}$, де $C_{ТАБ}$ – кількість А·год, яке може віддати ТАБ при номінальному режимі розряду) в діапазоні $\theta_{ТАБ} = 0,4...0,8$ [55].

При цьому поточне значення величини $\theta_{ТАБ}$ може бути визначено за величиною напруги $U_{ТАБ}$ на вихідних контактах ТАБ, значенням сили струму розряду/заряду $\pm I_{ТАБ}$ і температури електроліту батареї $t_{ТАБ}^0$.

При діагностуванні технічного стану тягового електроприводу ГСУ ступінь зарядженості ТАБ можна оцінити відповідно до виразу:

$$\theta_{ТАБ} = \theta_{ТАБ.0} - \frac{1}{3600 \cdot C_{ТАБ.ном}} \cdot \int_{ts}^{tf} I_{ТАБ} dt, \quad (2.82)$$

де $\theta_{ТАБ.0}$ - ступінь зарядженості ТАБ в момент діагностування.

Якщо уявити еквівалентну схему заміщення ТАБ у вигляді послідовного з'єднання еквівалентної ЕРС ($E_{ТАБ}$) і еквівалентного внутрішнього опору ($R_{ТАБ}$), напругу ТАБ можна визначити з виразу:

$$U_{ТАБ} = E_{ТАБ} - I_{ТАБ} \cdot R_{ТАБ}. \quad (2.83)$$

Цей вираз не враховує динамічні властивості ТАБ, якими при діагностуванні тягового електроприводу можна знехтувати. У загальному випадку $E_{ТАБ}$ і $R_{ТАБ}$ є функціями ступеня зарядженості ТАБ, температури електроліту ($t_{ТАБ}^0$), величини і напрямку струму ($I_{ТАБ}$).

$$E_{ТАБ} = E_{ТАБ}(\theta_{ТАБ}, I_{ТАБ}, t_{ТАБ}^0), R_{ТАБ} = R_{ТАБ}(\theta_{ТАБ}, I_{ТАБ}, t_{ТАБ}^0) \quad (2.84)$$

Потужність, що віддається або споживана акумуляторною батареєю, визначається виразом:

$$P_{TAB} = U_{TAB} \cdot I_{TAB} = (E_{TAB} - I_{TAB} \cdot R_{TAB}) \cdot I_{TAB} \quad (2.85)$$

Отже,

$$I_{TAB} = \frac{1}{2 \cdot R_{TAB}} (E_{TAB} - \sqrt{E_{TAB}^2 - 4 \cdot R_{TAB} \cdot P_{TAB}}) \quad (2.86)$$

Негативне значення підкорінного виразу в останній формулі відповідає випадку $P_{TAB} > P_{TAB, max}$, де $P_{TAB, max}$ – максимальна потужність, ТАБ. Отже,

$$P_{max} = \frac{E_{TAB}^2}{4 \cdot R_{TAB}} \quad (2.87)$$

Якщо живлення тягового електроприводу

$$\begin{cases} P_{TAB} = \frac{P_{VD}}{\eta_{inv}} + P_{dop}, \text{при} \\ P_{TAB} = P_{VD} \cdot \eta_{inv} + P_{dop} \end{cases} \quad (2.88)$$

де P_{VD} – потужність, споживана тяговим електроприводом. Якщо в якості тягового електроприводу виступає вентиляльний двигун.

$$P_{VD} = \frac{3}{2} \cdot (u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q) \quad (2.89)$$

У режимі двигуна $P_{VD} = P_{ptr} \geq 0$, в генераторному режимі $P_{VD} = P_{ptr} < 0$;

P_{dop} – потужність, споживана від бортової мережі додатковим електроустаткуванням;

η_{inv} – ККД трифазного інвертора з ШІМ.

2.5 Нейромережева модель оцінки технічного стану гібридної силової установки

Однією із головних задач, виникаючих під час експлуатації гібридного автомобіля є підтримка ефективності та надійності всіх його систем та

попередження відмов. Ця задача може бути вирішена на підставі оцінки силової установки гібридного автомобіля.

Нейромережева модель оцінки технічного стану силової установки дозволяє реалізовувати ресурсні можливості гібридних автомобілів виключно випадках їх передчасного відправлення в ремонт, зменшити кількість простоїв при технічному обслуговуванні, більш раціонально планувати режими роботи та визначення оптимального терміну експлуатації конкретного автомобіля, що знижує витрати на його обслуговування. Знання технічного стану силової установки необхідні для створення ремонтної бази та обґрунтування потреби в запасних частинах.

В теперішній час трудоміскість діагностування складає 40 % загальної трудовитрати технічного обслуговування. Використання стаціонарних та переносних діагностичних засобів пов'язано з операціями підключення, відладки та зняття датчиків та комунікаційної апаратури, що веде до значних витрат на допоміжні роботи, які складають майже 80...85 % часу повного циклу діагностування [46].

Дослідження [52] вказують на те, що використання бортових діагностичних систем дозволяє знизити трудовитрати діагностування на 35 % за рахунок зменшення кількості підготовчо-заклучних операцій. Такі системи враховують дані датчиків на різних режимах роботи при експлуатації автомобіля, відстежують зміни параметрів за таблицями, які зберігаються в пам'яті пристрою та інформують водія про появлення несправностей за допомогою багатофункціональних індикаторів на приладній панелі. Після ідентифікації збережених в пам'яті кодів помилок та аналіз додаткових даних оператором приймається рішення про наступні дії.

Головними труднощами при використанні бортових систем є правильна інтерпретація коду та визначення правильної причини появи несправності, що потребує високої кваліфікації оператора, а також складності розробки, виробництва та збільшення кількості використаних датчиків та збільшення мережі проводів [48].

Витрати енергії (палива, електроенергії) визначається вантажно-швидкісним режимом. На цій підставі енергетичні витрати визначають при заданих умовах експлуатації ресурс силової установки гібридного автомобіля. Ефективність витрати ресурсу силової установки гібридного автомобіля оцінюється за критерієм показника ресурсу. Крім того нейромережева модель оцінки технічного стану силової установки гібридного автомобіля інваріантна різним силовим установкам.

Технічний стан силової установки гібридного автомобіля залежить від вантажно-швидкісного режиму, а з іншого боку, витрата енергії (палива, електроенергії) також визначається вантажно-швидкісним режимом. При постійній швидкості руху взаємозв'язок між технічним станом силової установки та енергетичними витратами залежить від крутного моменту на колеса. Між технічним станом силової установки, енергетичними витратами та крутним моментом на колесах є пряма залежність.

Така залежність має підставу на наступне: при експлуатації гібридних автомобілів в конкретних умовах технічний стан силової установки за даний період часу можна оцінювати за енергетичними витратами. Сумарна витрата енергії відповідає пробігу гібридного автомобіля, при якому буде повна витрата ресурсу силової установки. Отже, множина пробігу гібридного автомобіля, при якому силова установка потребує ремонту, на витрату енергії в кВт-год на 100км пробігу є сумарна витрата енергії. Така величина для конкретної силової установки є постійна. При експлуатації гібридного автомобіля технічний стан силової установки зменшується на стільки, на скільки збільшується витрата енергії. Таку закономірність покладено в основу оцінки технічного стану силової установки гібридного автомобіля за сумарними витратами енергії.

Технічний стан ГСУ залежить від вантажно-швидкісного режиму, з іншого боку, витрата енергії (палива і електроенергії) також визначається вантажно-швидкісним режимом. При постійному швидкісному режимі взаємозв'язок між технічним станом силової установки і енергетичними затратами в основному залежить від крутного моменту на колінчастому валу. Між технічним станом

силової установки, енергетичними затратами і крутним моментом на колінчастому валу існує прямий зв'язок.

Такий взаємозв'язок дає підставу висловити наступне: при експлуатації гібридних автомобілів в певних умовах технічний стан силової установки за даний період часу можна оцінювати по енергетичним витратам. Сумарна витрата палива відповідає пробігу автомобіля, при якому настане повне вичерпання ресурсу силового. Отже, пробігу автомобіля, при якому силовому агрегату буде потрібно капітальний ремонт, на витрату палива в л/100 км пробігу є сумарний витрата палива. Ця величина для конкретного силового агрегату буде постійною. При експлуатації автомобіля ресурс двигуна і трансмісії зменшується на стільки, наскільки збільшується витрата палива. Ця закономірність і кладеться в основу оцінки ресурсу силового агрегату по загальній витраті палива.

Оцінка ресурсу силових агрегатів транспортних машин по витраті палива і швидкості руху має величезне значення для цілей планування і управління технічної служби АТП. Витрата палива і швидкості руху є енергетичними показниками використання транспортних машин в конкретних умовах експлуатації. З представлених вище рівнянь слід, що зі зменшенням ресурсу силової установки і підвищенням швидкості руху спостерігається збільшення витрати палива силових агрегатів транспортних машин.

Тому всі заходи спрямовані на зниження витрати палива і підвищення середніх швидкостей руху є одночасно дієвими і на підвищенні ресурсу силової установки гібридних транспортних машин. Ефективність витрачання ресурсу силової установки гібридних транспортних машин можна оцінити критерієм показника ресурсу, який визначається за виразом:

$$\left. \begin{aligned} K_p &= \frac{(Q_\phi + 0,091 \cdot E_{AKB}) \cdot V_a}{0,35 \cdot Q_{\max} \cdot V_{\max}} \text{ при } V_a \leq 0,3 \cdot V_{\max} \\ K_p &= \frac{0,35 \cdot Q_\phi \cdot V_{\max}}{(Q_\phi + 0,091 \cdot E_{AKB}) \cdot V_a} \text{ при } V_a > 0,3 \cdot V_{\max} \end{aligned} \right\}, \quad (2.90)$$

де Q_ϕ , $Q_{\min}$ – відповідно фактичний і мінімальний витрата палива гібридного автомобіля в л/100 км пробігу;

- відповідно максимальна та середня швидкість руху автомобіля; км/год;
- ємність акумуляторної батареї, кВт-год.

Фактична витрата пального (Q_ϕ) визначається за виразом, л/100 км:

$$Q_\phi = \frac{100 \cdot g_e \cdot N_e}{V_a \rho_T}, \quad (2.91)$$

де g_e – питома витрата пального, кг/кВт-год;

ρ_T – питома вага палива, г/г;

N_e – ефективна потужність ДВЗ, кВт.

Питома витрата палива має мінімум на вузькому діапазоні тягово-швидкісних режимів ДВЗ гібридного автомобіля. В даному випадку питому витрату палива слід приймати величиною постійною, оскільки ДВЗ працює тільки в вузькому вантажно-швидкісному режимі.

Ефективна потужність ДВЗ (N_e) визначається так, кВт:

$$N_e = \frac{M_{кр} \cdot n}{900}, \quad (2.92)$$

де $M_{кр}$ – крутний момент ДВЗ, кН;

n – швидкість обертання колінчастого валу ДВЗ, хв.

Крутний момент ДВЗ ($M_{кр}$) можна визначити через продуктивність паливних форсунок наступним чином, Н м:

$$M_{кр} = C \cdot n \cdot T_B, \quad (2.93)$$

де $C=6,9 \cdot 10^{-3} \text{ V } X_\psi$;

V – продуктивність паливної форсунки, мл;

X_ψ – кількість циліндрів ДВЗ;

T_B – час впорскування палива форсункою, с.

Ємність тягової акумуляторної батареї визначається величинами напруги U і струму I , а також залежить від температури зовнішнього середовища, кВт-год.

$$E_{AKB} = U \cdot I (0,85 + 0,005 \cdot t_B) \cdot 10^{-3} = 0, \quad (2.94)$$

де t_B – температура зовнішнього середовища, °С.

На підставі вище наведеного коефіцієнт оцінки технічного стану гібридної силової установки має таку залежність:

$$K_p = A \cdot \left[B \cdot V_a \cdot n^2 \cdot T_g + 9,1 \cdot 10^{-4} \cdot U \cdot I \cdot (0,85 + 0,05 \cdot t_g) \right] \cdot V_a, \quad (2.95)$$

де $A = 0,35 \cdot Q_{min} \cdot V_{max}$;

$B = 12,8 \cdot 10^{-6} \cdot g_e \cdot V \cdot X_u$;

Заходи, які спрямовані на зменшення витрат палива і підвищення швидкості руху транспортної машини, в результаті збільшують ресурс силової установки гібридного автомобіля. В умовах високої вартості експериментальних даних, їх обмеженої кількості, високої рівнем шуму, неповноти, а часто і суперечливості, у багатьох випадках найкращими виявляються моделі на основі штучних нейронних мереж (ІНС) [70, 85].

Побудова нейромережевої діагностичної моделі являє собою спосіб представлення нелінійного перетворення у вигляді композиції багатовимірних лінійних і одновимірних нелінійних перетворень. При цьому методи знаходження оптимальної структури ІНС сьогодні невідомі. Найбільш широке застосування для вирішення завдання апроксимації нелінійних залежності $y = f(x_1, x_2, \dots, x_{\lambda-1})$ отримав багатошаровий персептрон:

$$y = f_q \left(\mathbf{B}_q + \mathbf{W}_q \cdot \left(f_{q-1} \left(\mathbf{B}_{q-1} + \mathbf{W}_{q-1} \cdot \left(\dots f_1 \left(\mathbf{B}_1 + \mathbf{W}_1 \cdot [x_1, x_2, \dots, x_{\lambda-1}]^T \right) \right) \right) \right) \right), \quad (2.96)$$

де q – кількість шарів мережі; $\mathbf{B}_i$ – вектор зсувів i -го шару; $\mathbf{W}_i$ – матриця вагових коефіцієнтів i -го шару; $f_i(\circ)$ – функція активації i -го шару. В якості активаційних функцій нейронів прихованих шарів в більшості випадків використовуються функції гіперболічного тангенса:

$$f_i(s) = th(s) = \frac{2}{1 + e^{-2 \cdot s}} - 1, \quad (2.97)$$

а для вихідного шару вибирають лінійну активаційну функцію.

Аналізом досліджень [10,63] було встановлено, що така ІНС з одним прихованим і одним вихідним шаром здатна апроксимувати з будь-який наперед

заданою точністю на компактному безлічі довільну безперервну функцію. Проте, з даних досліджень не слід, що один прихований шар є оптимальним в сенсі часу навчання, простоти реалізації і якості узагальнення. Завдання структурної ідентифікації моделі ІНС може бути параметризовано шляхом кодування різних структур вектором структурних параметрів $\mathbf{D}$. В даному випадку елементами вектору $\mathbf{D}$ є кількість шарів мережі, і кількості нейронів в прихованих шарах, які визначають розмірності відповідних матриць вагових коефіцієнтів і зсувів нейронів.

Таким чином, ідентифікація залежності $f_i(s) = t \cdot h(s) = \frac{2}{1 + e^{-2s}} - 1$ полягає у виборі оптимальної структури мережі $\tilde{\mathbf{D}}$ і її навчанні, тобто такого налаштування параметрів $\tilde{\mathbf{B}}_i$ и $\tilde{\mathbf{W}}_i$, $i = \overline{1, q}$ і її навчанні, тобто такого налаштування параметрів:

$$J_{CPG}(\mathbf{D}, \mathbf{B}_i, \mathbf{W}_i) = \frac{1}{N_{CPG}} \sum_{n=1}^{N_{CPG}} \left(\hat{P}_v^n - P_{v.CPG}(\mathbf{X}_n, \mathbf{D}, \mathbf{B}_i, \mathbf{W}_i) \right)^2, \quad (2.98)$$

де $P_{v.CPG}$ – вихідний сигнал нейронної мережі, що апроксимує характеристику критерію показника технічного стану ДВЗ, при подачі на її вхід вектора $\mathbf{X}_n = [\hat{\omega}_{kv}^n, \hat{I}_{st}^n, \hat{U}_{ab}^n, \hat{T}_m^n]$, $n = \overline{1, N_{CPG}}$:

$$\langle \tilde{\mathbf{D}}, \tilde{\mathbf{B}}_i, \tilde{\mathbf{W}}_i \rangle = \arg \min_{\mathbf{D}, \mathbf{B}_i, \mathbf{W}_i} J_{CPG}(\mathbf{D}, \mathbf{B}_i, \mathbf{W}_i). \quad (2.99)$$

Для вирішення ідентифікаційної завдання можуть бути використані відомі методи навчання нейронних мереж.

При дослідженні закономірностей зміни технічного стану ДВЗ нерідко виникає ситуація, коли при нестачі кількісних даних про досліджуваних характеристиках є деякі якісні відомості, представлені, наприклад, у вигляді слабо формалізованих знань експертного співтовариства. Найбільш повно використовувати дані відомості при ідентифікації залежності, що характеризують технічний стан паливної та запалювальної систем, можливо при використанні систем нечіткого виводу.

Можливість застосування апарату нечіткої логіки для ідентифікації залежності $P_v = f_{CPG}(\omega_{kv}, I_{st}, U_{ab}, T_m)$ базується на наступних результатах:

1). В 1992 р. Ванг (Wang) довів теорему, згідно з якою для кожної речової безперервної функції $G(x)$, заданої на компактному безлічі U , і для довільного $\varepsilon > 0$ існує нечітка експертна система, що формує вихідну функцію $F(x)$ таку, що

$$\sup \|F(x) - G(x)\| \leq \varepsilon, \quad (2.100)$$

де $\|\circ\|$ – символ прийнятого відстані між функціями;

2). В 1993 р. Б. Коско (B. Kosko) довів теорему про нечіткої апроксимації (Fuzzy Approximation Theorem), згідно з якою будь-яка математична система може бути апроксимована системою, заснованої на нечіткій логіці.

3). В 1995 р. Кастро (Castro) показав, що логічний контролер Мамдані при певних умовах є універсальним аппроксиматором.

Одним з найбільш поширених і довели свою ефективність методів нечіткого виводу є алгоритм Мамдані, запропонований в 1975 р англійським математиком Е. Мамдані (Ebrahim Mamdani).

Використання системи нечіткого виведення відповідно до цього алгоритмом передбачає введення лінгвістичних змінних $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_{\lambda-1}$ і $\tilde{y}$, відповідних вхідним і вихідним параметрам досліджуваних залежності. Дані змінні задаються на базових терм-множинах $\mathbf{X}_j = \{\mathbf{x}_{ji}\}_{i=1}^{I_{x_j}}$ и $\mathbf{Y} = \{\mathbf{y}_i\}_{i=1}^{I_y}$, де I_{x_j}, I_y – кількість термів у відповідних терм-множин; $j = \overline{1, \lambda-1}$. Кожне із значень (термів) кожної лінгвістичної змінної являє собою окрему нечітку змінну з функцією приналежності у вигляді гаусом функції з центром і варіацією σ :

$$\mu_{\mathbf{x}_{ji}}(x_j, \sigma_{\mathbf{x}_{ji}}, c_{\mathbf{x}_{ji}}) = \exp\left[\frac{-(x_j - c_{\mathbf{x}_{ji}})^2}{2\sigma_{\mathbf{x}_{ji}}^2}\right], \quad \mu_{\mathbf{y}_i}(y, \sigma_{\mathbf{y}_i}, c_{\mathbf{y}_i}) = \exp\left[\frac{-(y - c_{\mathbf{y}_i})^2}{2\sigma_{\mathbf{y}_i}^2}\right], \quad (2.101)$$

де $x_j \in [x_{j.\min}, x_{j.\max}]$, $y \in [y_{\min}, y_{\max}]$ – носії відповідних нечітких множин.

Для формалізації якісних знань про досліджувані характеристики складається база правил нечітких продукцій, в яких умови і укладення сформульовані в термінах нечітких лінгвістичних висловлювань:

$$\begin{aligned} P_1: & \text{Якщо } \tilde{x}_1 = \mathbf{x}_{1a_1} \text{ і } \tilde{x}_2 = \mathbf{x}_{2b_1} \text{ і...і } \tilde{x}_{\lambda-1} = \mathbf{x}_{2c_1} \text{ тоді } y = y_{d_1}; \\ P_2: & \text{Якщо } \tilde{x}_1 = \mathbf{x}_{1a_2} \text{ і } \tilde{x}_2 = \mathbf{x}_{2b_2} \text{ і...і } \tilde{x}_{\lambda-1} = \mathbf{x}_{2c_2} \text{ тоді } y = y_{d_2}; \\ & \dots \\ P_k: & \text{Якщо } \tilde{x}_1 = \mathbf{x}_{1a_k} \text{ і } \tilde{x}_2 = \mathbf{x}_{2b_k} \text{ і...і } \tilde{x}_{\lambda-1} = \mathbf{x}_{2c_k} \text{ тоді } y = y_{d_k} \end{aligned} \quad (2.102)$$

де k – кількість правил, що є основою правил нечітких продукцій; $a_i \in \{1, 2, \dots, Ix_1\}$; $b_i \in \{1, 2, \dots, Ix_2\}$; $c_i \in \{1, 2, \dots, Ix_{\lambda-1}\}$; $d_i \in \{1, 2, \dots, Iy\}$. Кожному правилу відповідає ваговий коефіцієнт w_i , $i = \overline{1, k}$.

Реалізація нечіткого виведення згідно з алгоритмом Мамдані вимагає виконання ряду етапів.

1). Фазифікації, метою якої є встановлення відповідності між конкретними значеннями $x_1^*, x_2^*, \dots, x_{\lambda-1}^*$ вхідних параметрів досліджуваних залежності і значеннями функцій належності $\mu_{x_{ji}}(x_j^*, \sigma_{x_{ji}}, c_{x_{ji}})$, $j = \overline{1, \lambda-1}$, $i = \overline{1, Ix_j}$ термів лінгвістичних змінних $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_{\lambda-1}$, відповідних цим параметрам;

2). Агрегування підумови в нечітких правилах, яке представляє собою процедуру визначення ступеня істинності γ_i , $i = \overline{1, k}$ умов по кожному з правил системи нечіткого виведення. При цьому ступінь істинності кожної підумови β_{ji} , $j = \overline{1, \lambda-1}$, $i = \overline{1, k}$ визначається значенням функції приналежності відповідного терма. Для визначення результату нечіткої кон'юнкції (зв'язка «І») може бути використана функція $\min$, а для визначення результату нечіткої диз'юнкції (зв'язка «АБО») - функція $\max$:

$$\gamma_i = w_i \cdot \min_{j=1, \lambda-1} \{\beta_{ji}\}; \gamma_i = w_i \cdot \max_{j=1, \lambda-1} \{\beta_{ji}\}, i = \overline{1, k}; \quad (2.103)$$

3). Активація заключень в нечітких правилах, яка представляє собою процедуру визначення ступеня істинності заключення кожного правила у вигляді

нечітких множин з функціями належності $\mu'_{y_i}(y)$, $i = \overline{1, k}$ і виконується згідно виразу:

$$\mu'_{y_i}(y) = \min\{\gamma_i, \mu_{y_i}(y)\}, \quad (2.103)$$

де $\mu_{y_i}(y)$ – функції приналежності термів вихідної лінгвістичної змінної, що входять в підзаключення i -го правила бази правил нечітких продукцій;

4). Акумуляція висновків нечітких правил, що представляє собою процедуру об'єднання нечітких множин, що відповідають термам підзаключень вихідний лінгвістичної змінної окремих правил:

$$\mu_y(y) = \max_{i=\overline{1, k}}\{\mu'_{y_i}(y)\}. \quad (2.104)$$

5). Дефазифікація вихідної змінної, що забезпечує визначення її звичайного (НЕ нечіткого) значення, може бути виконана з використанням методу центру тяжіння:

$$y^* = \frac{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} y \cdot \mu_y(y) dy}{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \mu_y(y) dy}. \quad (2.105)$$

Розглянута система нечіткого виведення може здійснювати грубу апроксимацію залежності, що характеризує знос ЦПГ і КШМ. Точність такої апроксимації визначається параметрами задаються лінгвістичних змінних, а також якістю і повнотою бази правил нечітких продукцій, які акумулюють в собі апріорну інформацію про досліджувані явища.

Для збільшення точності апроксимації необхідно здійснити адаптацію системи нечіткого виведення до особливостей досліджуваних процесів з використанням масивів експериментально отриманих даних

$\left\{(\hat{P}_v^n, \hat{\omega}_{kv}^n, \hat{I}_{st}^n, \hat{U}_{ab}^n, \hat{T}_m^n)\right\}_{n=1}^{N_{CPG}}$ – характеризують технічний стан силової установки гібридного автомобіля.

Процес адаптації полягає в оптимізації вектору параметрів $\mathbf{P} = \left[w_i, \sigma_{x_{jl}}, c_{x_{jl}}, \sigma_{y_m}, c_{y_m} \right]$, $i = \overline{1, k}$, $j = \overline{1, \lambda - 1}$, $l = \overline{1, Lx_j}$, $m = \overline{1, Ly}$, системи нечіткого виведення, елементами якого є значення вагових коефіцієнтів правил нечітких продукції і параметри функцій приналежності термів лінгвістичних змінних.

Оптимальний вектор параметрів $\tilde{\mathbf{P}}$ при дослідженні характеристики технічного стану силової установки гібридного автомобіля визначається виразом:

$$\tilde{\mathbf{P}} = \arg \min_{\mathbf{P}} \left\{ \frac{1}{N_{CPG}} \sum_{n=1}^{N_{CPG}} \left(\hat{P}_v^n - P_{v.CPG}(\mathbf{X}_n, \mathbf{P}) \right)^2 \right\}, \quad (2.106)$$

де $P_{v.CPG}$ – вихідний сигнал системи нечіткого виведення з параметрами, апроксимуючої характеристику технічного стану ДВЗ, при подачі на її вхід вектору $\mathbf{X}_n = \left[\hat{\omega}_{kv}^n, \hat{I}_{st}^n, \hat{U}_{ab}^n, \hat{T}_m^n \right]$, $n = \overline{1, N_{CPG}}$.

2.6 Висновки до розділу

1. Процес зміни технічного стану силової установки гібридного автомобіля тече повільно та відрізняється конкретним напрямком. Це дозволяє рахувати цей процес квазидетермінованим та описувати його детермінованими функціями часу.

2. Виконана формальна постановка оптимізаційної задачі діагностування ГСУ при векторному функціоналі якості управління. Компонентами векторного функціоналу прийнято критерії точності управління, використання енергії ТАБ, ступеня токсичності відпрацьованих газів. В основі синтезу математичної моделі діагностики технічного стану ГСУ лежить апроксимація нейронними мережами характеристик ДВЗ, які базуються на діагностичних даних випробувань ДВЗ.

3. Отримано нейромережеву модель оцінки технічного стану ГСУ на базі енергетичних витрат. Розглянуті особливості діагностики технічного стану ДВЗ

ГСУ, які відображають швидкісні характеристики ДВЗ і показники його економічності та токсичності відпрацьованих газів.

4. Визначено стійку і ефективну роботу тягового електродвигуна ГСУ у всьому діапазоні тягово-швидкісних режимів, що задаються за умовами обмеження споживаної потужності ТАБ. Отримано математичні моделі складових ГСУ, як ДВЗ, тягового електродвигуна та ТАБ.

5. Результати досліджень другого розділу опубліковані в роботах [2, 3, 5,7,15,16].

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГІБРИДНОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Методика і апаратура експериментальних досліджень

Для визначення технічного стану силової установки гібридного автомобіля та отримання обґрунтованих діагностичних параметрів були проведені експериментальні дослідження на гібридному автомобілі Toyota Prius з метою визначити зміни напруги та струму. Це дозволило визначити в умовах експлуатації межі зміни зарядного струму та напруги АКБ і режими роботи ДВЗ.

Для дослідження технічного стану гібридної силової установки автомобіля Toyota Prius було використано бортовий вимірювальний комплекс, який розроблено на кафедрі автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Основою вимірювального комплексу (рис. 3.1) є АЦП з інтерфейсом ISA типу PCL-711. В якості програмного забезпечення був обраний пакет Advantec Genidaq 4.1. Крім того для вимірювання таких параметрів, як час впорскування палива, масова витрата повітря, оберти електричних машин був використаний мотортестер MODIS.

Для вимірювання струмів генератора MG1 та електродвигуна MG2 був застосований датчик, на основі двох датчиків Хола типу SS49E в диференціальному включенні, встановлений у корпусі інвертора (рис. 3.2) на шині генератора MG1 (рис. 3.3). Тоді відповідно до першого закону Кірхгофа:

$$I_{MG2} = I_{AKB} - I_{MG1} \quad (3.1)$$

Для посилення сигналу з датчика струму генератора використовується диференційний підсилювач на основі двох операційних підсилювачів типу AD 820 (рис. 3.4).

Для вимірювання струму АКБ використовується датчик CSNA 111 безконтактного типу на основі ефекту Хола (рис. 3.5, 3.6).

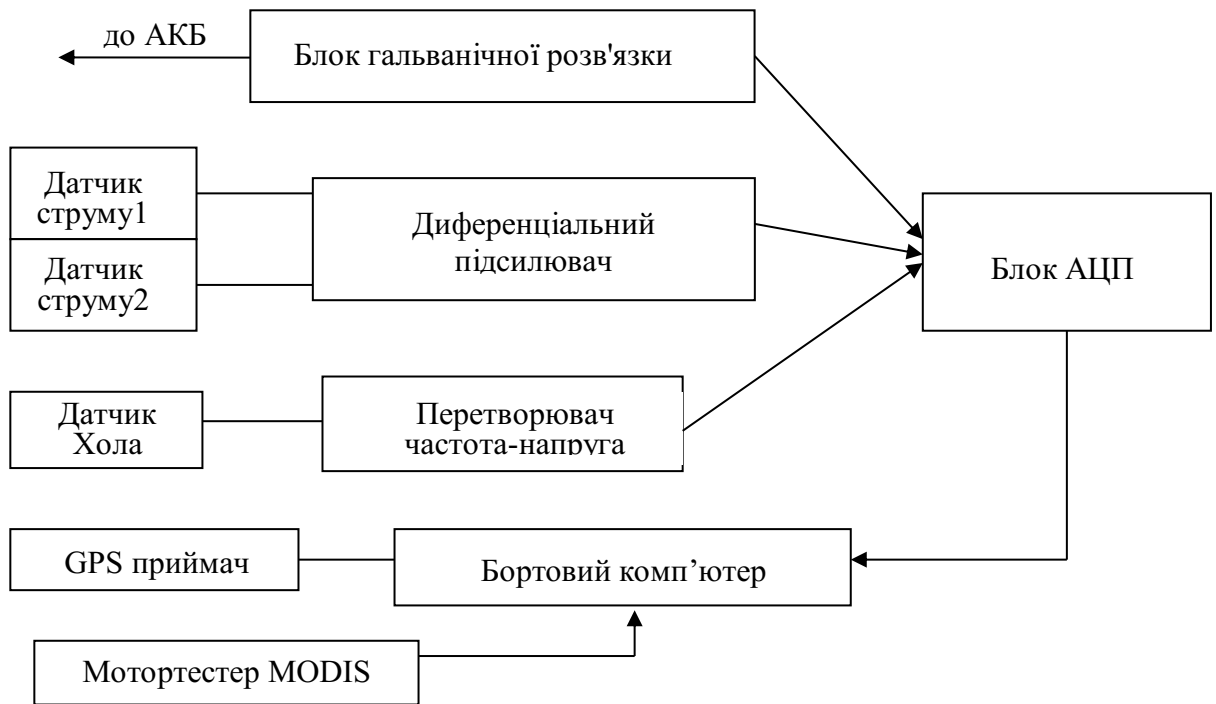


Рисунок 3.1 – Структурна схема вимірювального комплексу

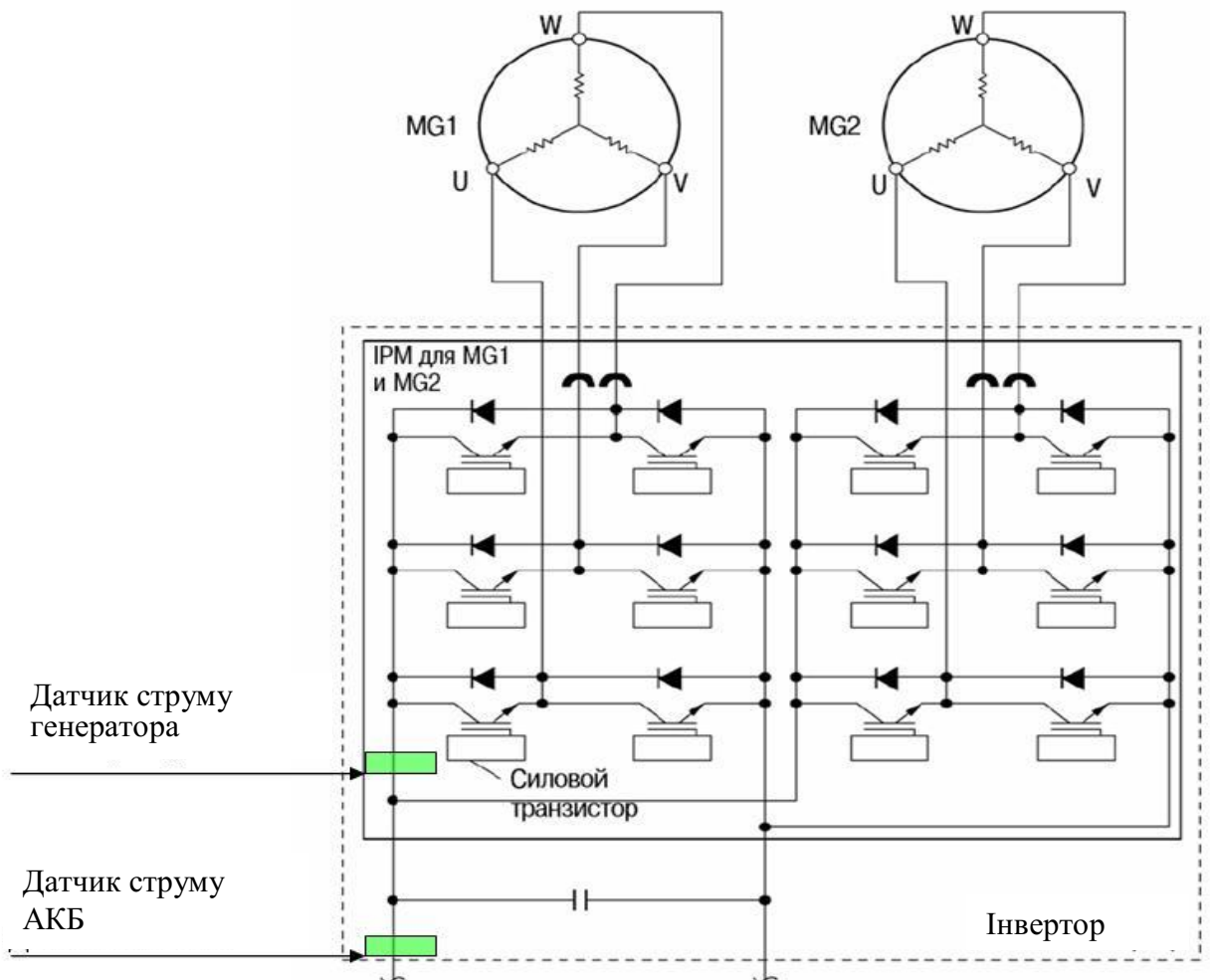


Рисунок 3.2 – Схема підключення датчиків струму

Для вимірювання оборотів ДВЗ використовується датчик Хола типу SS411, встановлений безпосередньо на котушці запалювання (рис. 3.7). Принципова схема тахометра (рис. 3.8).

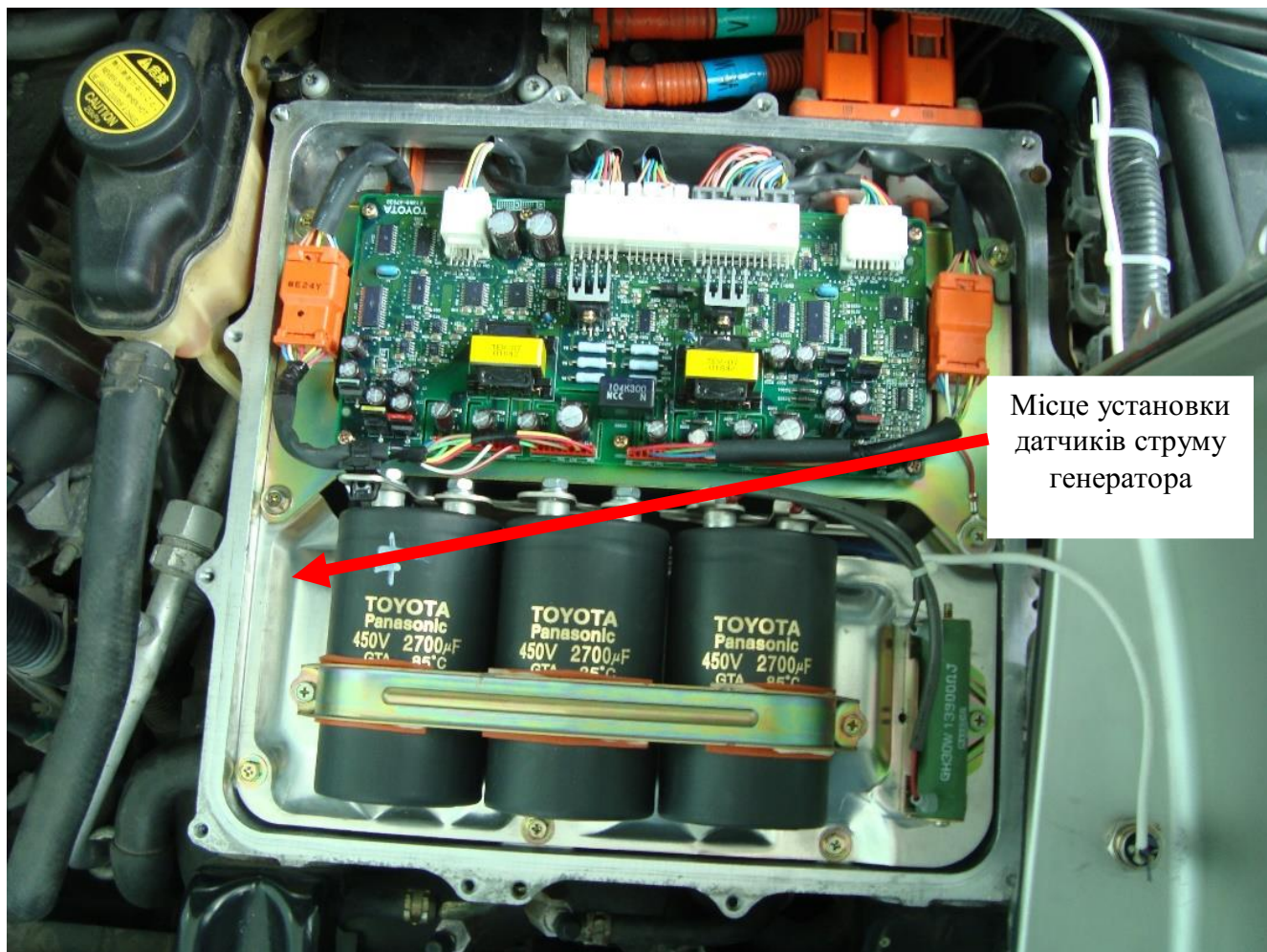


Рисунок 3.3 – Місце встановлення датчиків струму

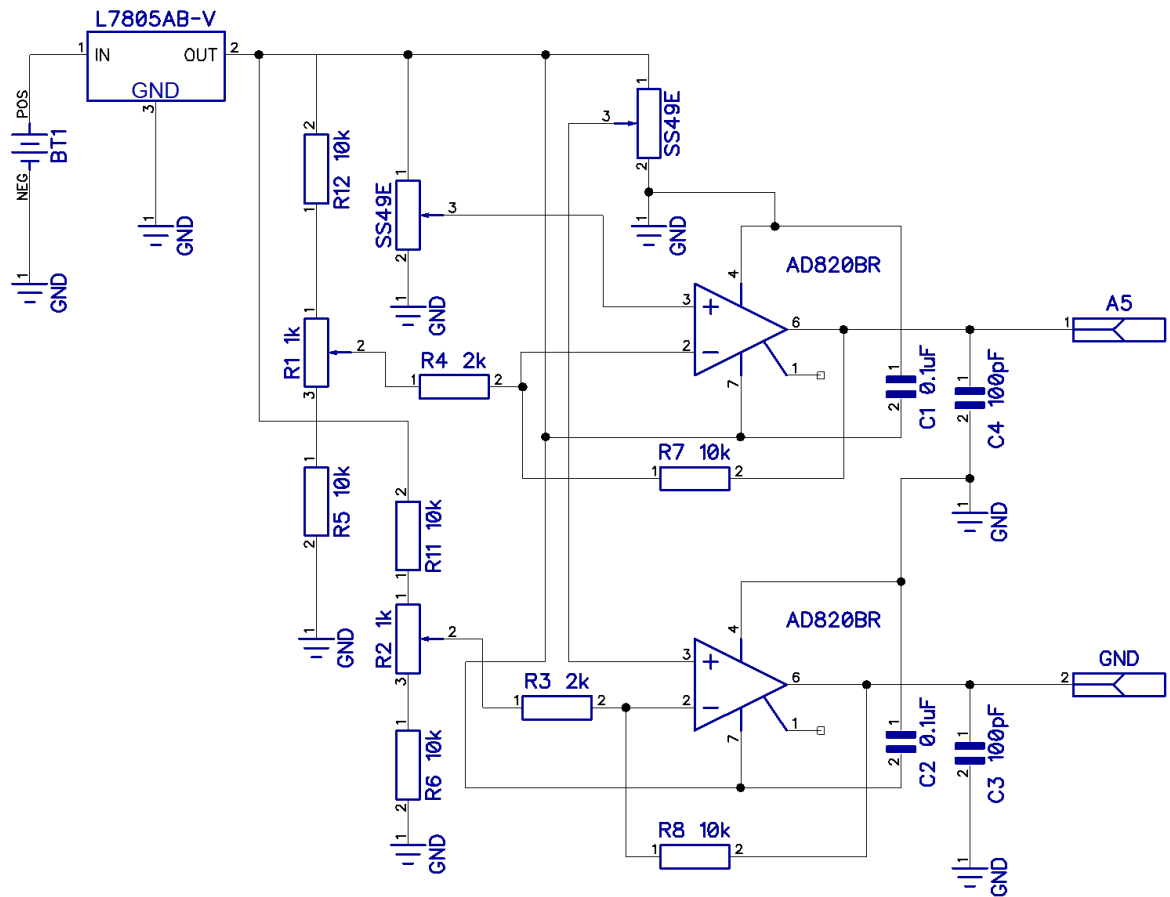


Рисунок 3.4 – Підсилювач сигналу датчиків струму генератора

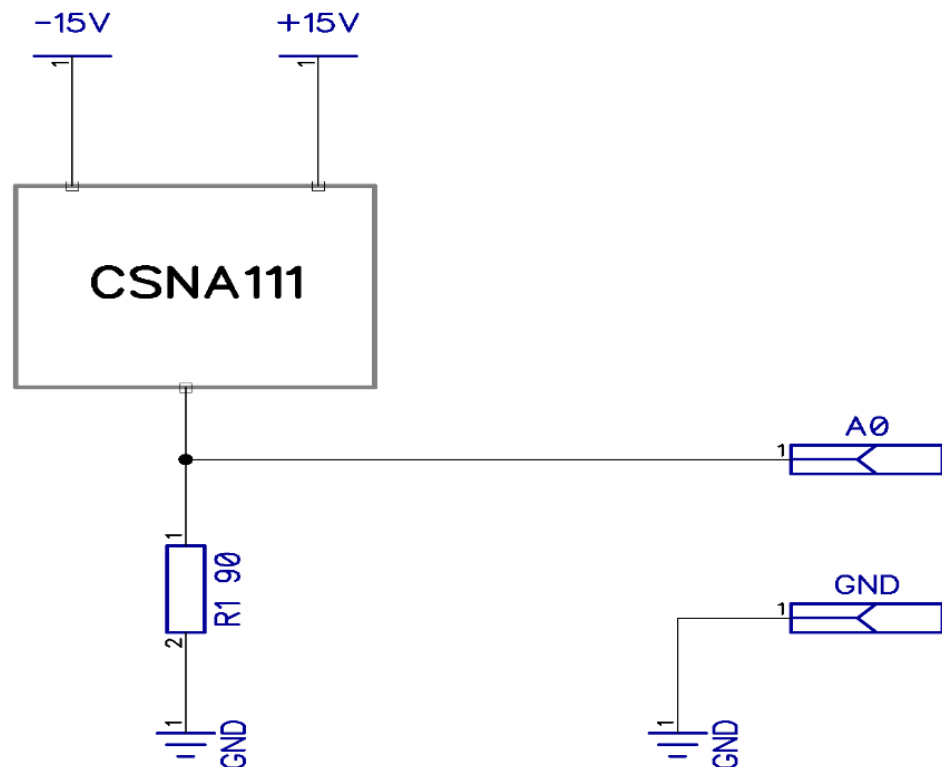


Рисунок 3.5 – Схема підключення датчика струму АКБ

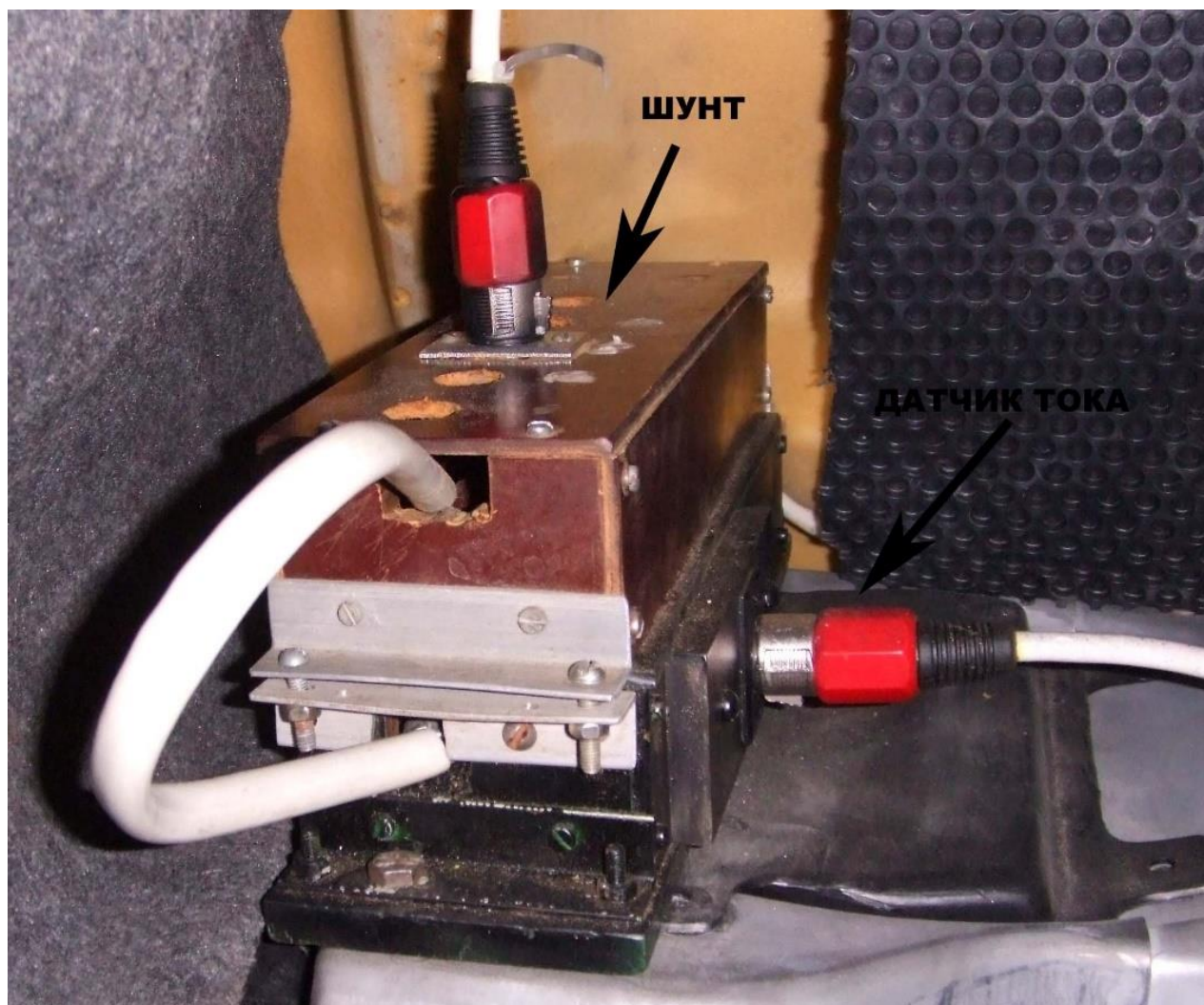


Рисунок 3.6 – Датчик струму АКБ

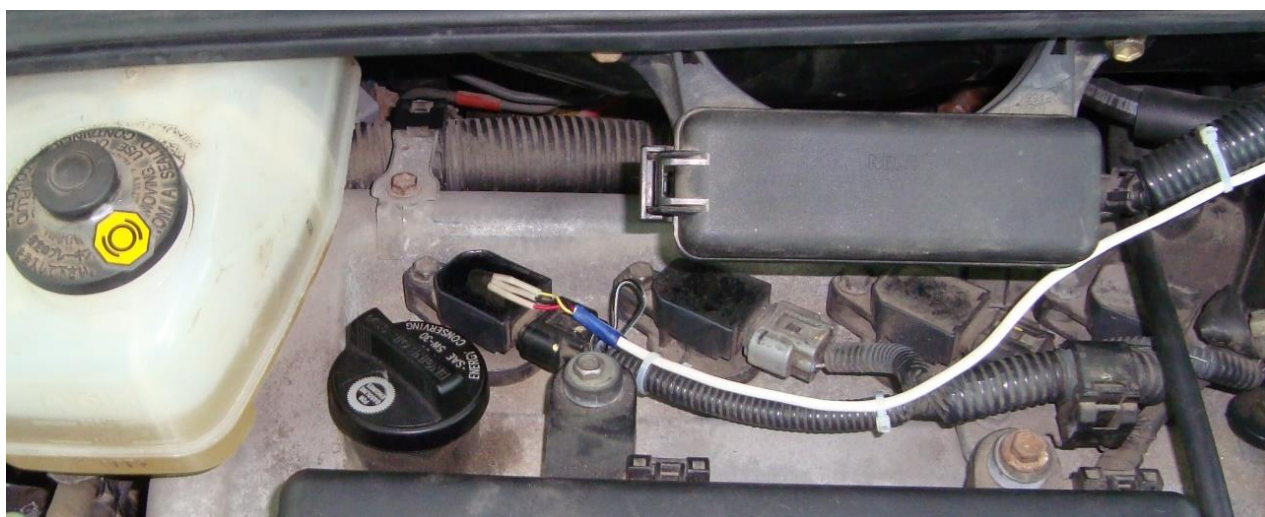


Рисунок 3.7 – Датчик тахометра ДВЗ

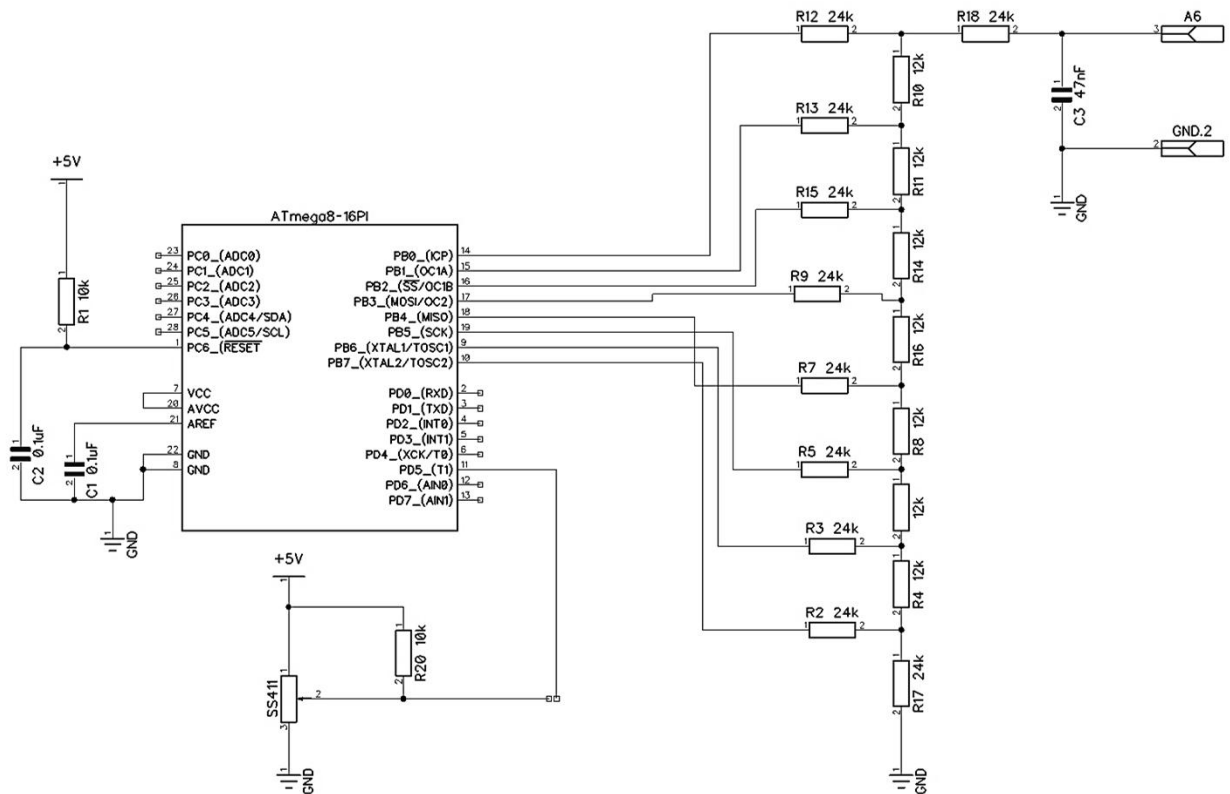


Рисунок 3.8 – Принципова схема тахометра

Вимірювання швидкості руху автомобіля проводиться за допомогою датчика швидкості колеса, що входить до складу АБС. Принципова схема каналу вимірювання швидкості (рис. 3.9).

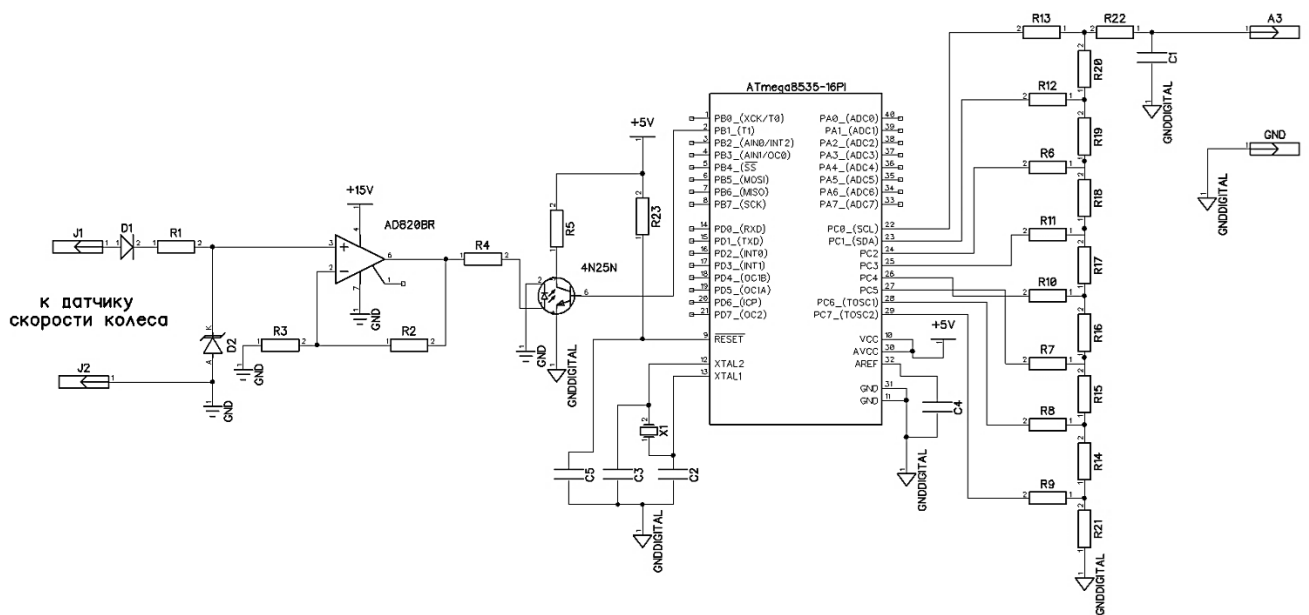


Рисунок 3.9 – Принципова схема каналу вимірювання швидкості

Тарування датчика швидкості відбувається за допомогою GPS приймача BU-353.

Для вимірювання напруги тягової АКБ використовується гальванічне розв'язаний підсилювач на основі високо-лінійного оптрона HCNR 200 (рис. 3.10 – 3.13).

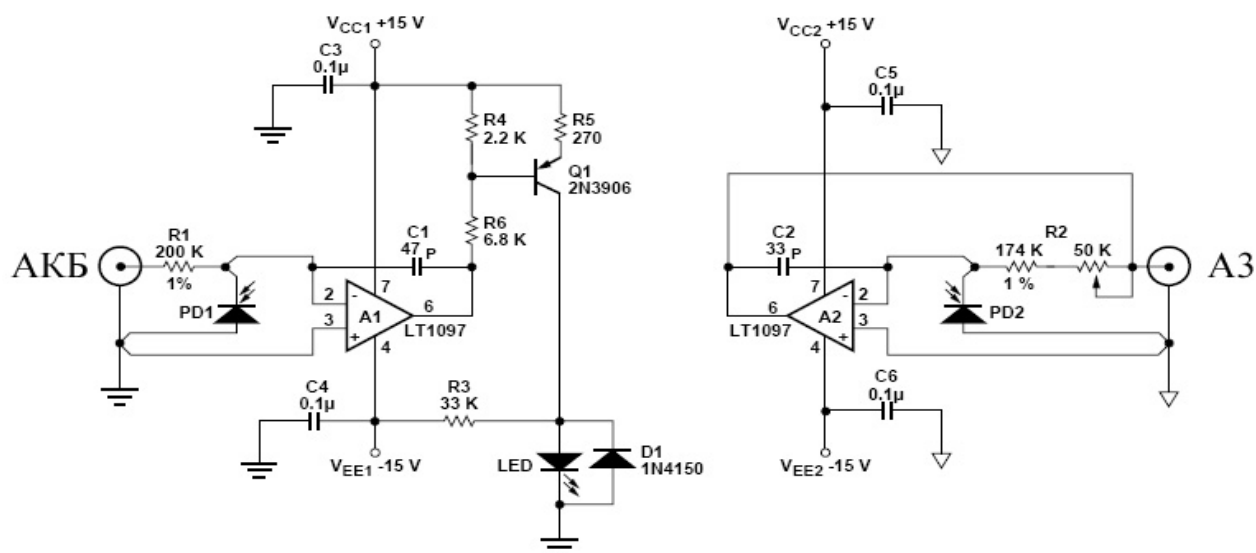


Рисунок 3.10 – Гальванічна розв'язка каналу вимірювання високої напруги



Рисунок 3.11 – Основний модуль

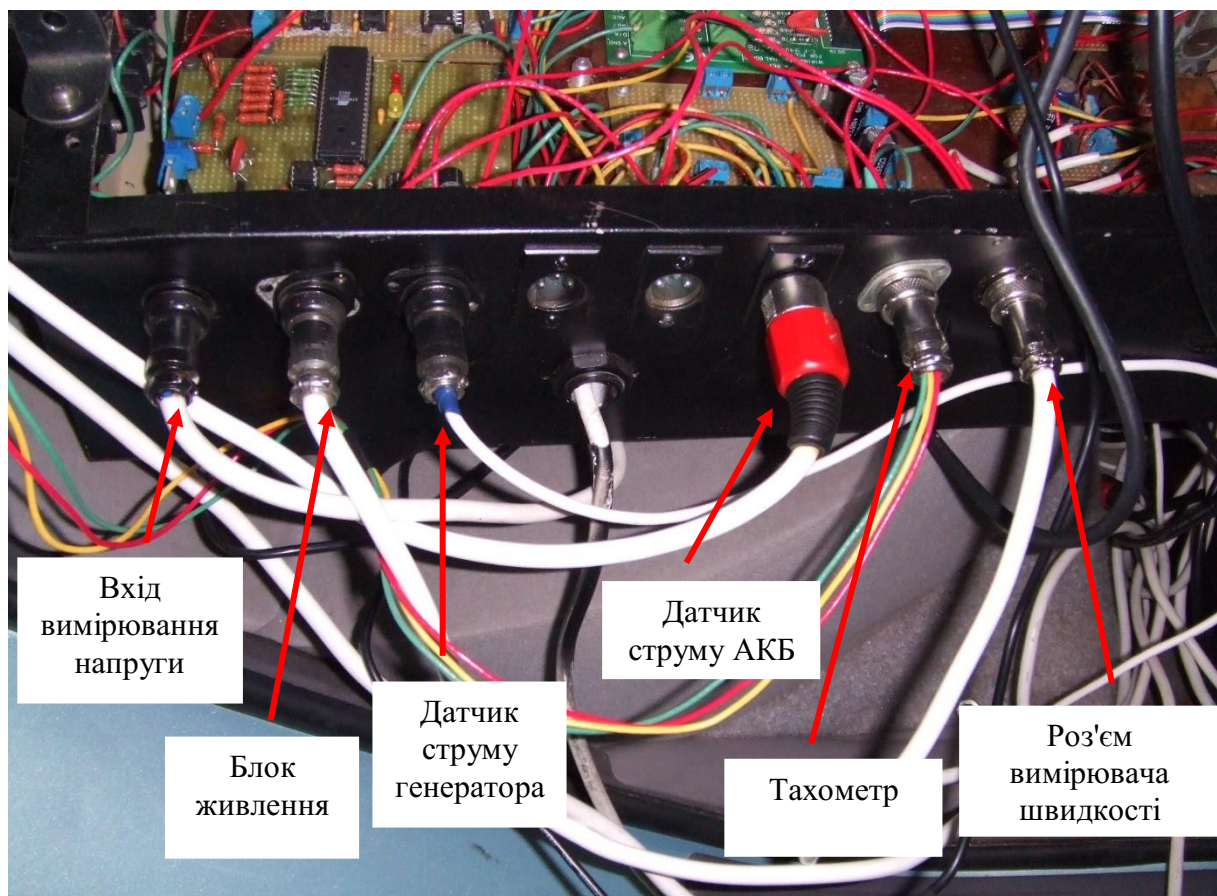


Рисунок 3.12 – Схема підключення датчиків

Сигнали з датчиків надходять в основний модуль (рис. 3.13), де відбувається їх перетворення до виду придатного для вимірювання за допомогою АЦП. Вимірювальний комплекс на автомобілі та його інтерфейс (рис. 3.13).

Для дослідження паливної системи ДВЗ ГСУ було розроблено лабораторний стенд для визначення технічного стану електромагнітних форсунок розподіленої системи впорскування палива (рис. 3. 14). Для отримання сигналів з датчиків синхронізації роботи електронних систем відповідно до положення колінчатого та розподільчого валів на стенді передбачено електропривод з частотою обертання ведучого шківa 1500 об/хв.

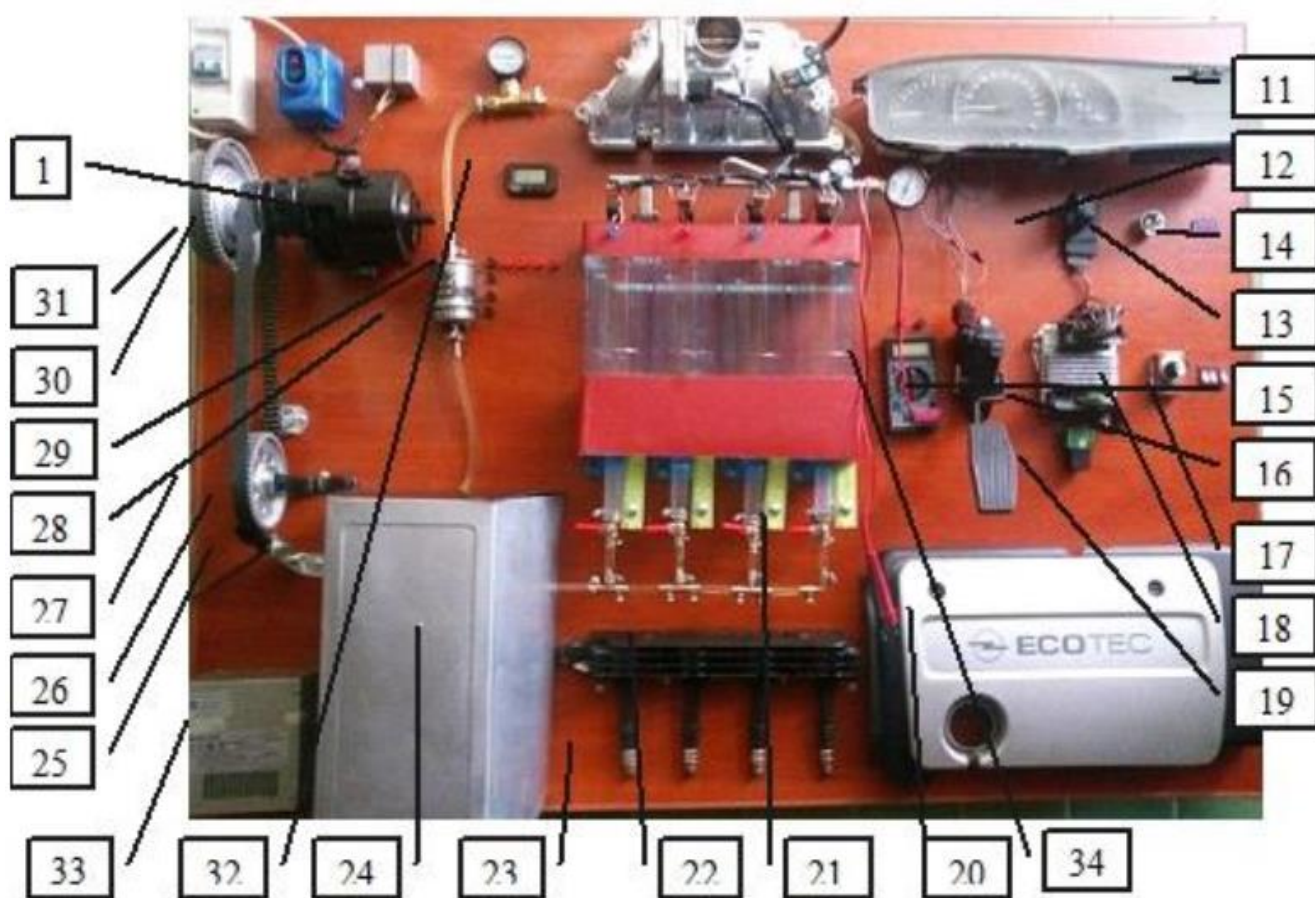
Додатково стенд обладнаний електронним модулятором кількості керуючих імпульсів 11, що подаються на блок керування 12 для імітації режимів роботи ДВЗ на різних частотах обертання колінчастого валу. Величина з імітованої частоти обертання контролюється за показами електронного тахометра розміщеного на панелі приладів 8. Тиск, що створюється електронасосом в системі паливоподачі визначається за показами манометра 3,

тиск у паливній рампі 7 контролюється додатковим манометром. За потреби, керування дросельною заслінкою здійснюється педаллю акселерометра (поз. 5, 14). Візуальний контроль сигналу керування електромагнітними форсунками проводиться за увімкненням відповідних світлодіодів (поз.6). Якість розпилення палива окремими форсунками можна спостерігати через прозорі стінки колби 16 у нижній частині яких закріплені мірні колби 15 для визначення кількості пального, що подається кожною форсункою за визначений інтервал часу.

Після вимірювання паливо через запірні крани зливається у паливний бак 18. Вимірювання електричних параметрів у контрольних точках електричної схеми стенда здійснюється портативним мультиметром через роз'єми 2. Для діагностування роботи електронної системи передбачено діагностичний роз'єм 9.



Рисунок 3.13 – Вимірювальний комплекс на автомобілі



1 – пульт увімкнення стенда; 2 – роз'єми для вимірювання параметрів контрольних точок електричної схеми с тенду; 3 – манометр магістралі живлення паливом; 4 – таймер; 5 – впускний колектор з дросельною заслінкою; 6 – електромагнітна форсунка і світловий сигналізатор роботи форсунки; 7 – паливна рампа; 8 – панель приладів тахометра; 9 – діагностичний роз'єм; 10 – імобілайзер; 11 – регулятор імпульсів; 12 – блок керування; 13 – реле насоса і форсунок; 14 – електровузол передачі акселератора; 15 – мірна колба; 16 – колби для визначення якості розпилення палива; 17 – модуль запалення; 18 – паливний бак з електричним бензонасосом; 19 – блок живлення автомобільного електрообладнання; 20 – датчики синхронізації роботи електронних систем з положенням колінчастого валу ДВЗ.

Рисунок 3.14 – Лабораторний стенд для діагностування технічного стану електромагнітних форсунок розподіленої системи впорскування ДВЗ:

3.2 Результати дослідження зміни технічного стану гібридної силової установки

У ході проведення дорожніх випробувань на автомобілі Toyota Prius було визначено наступне:

- Режим руху на електротязі при рівномірному русі і зарядженому акумуляторі: визначити швидкість руху автомобіля при якій включається ДВЗ, потужність електродвигуна при включенні ДВЗ, потужність рециркуляції енергії через генератор. Дані параметри необхідні для з'ясування тієї межі потужності ДВЗ яка нераціональна при рівномірному русі.

- Режим руху на електротязі на крутий підйом. Необхідно визначити максимальну потужність електродвигуна при якій включається ДВЗ, незалежно від швидкості руху. Даний параметр також необхідний для визначення меж використання ДВЗ.

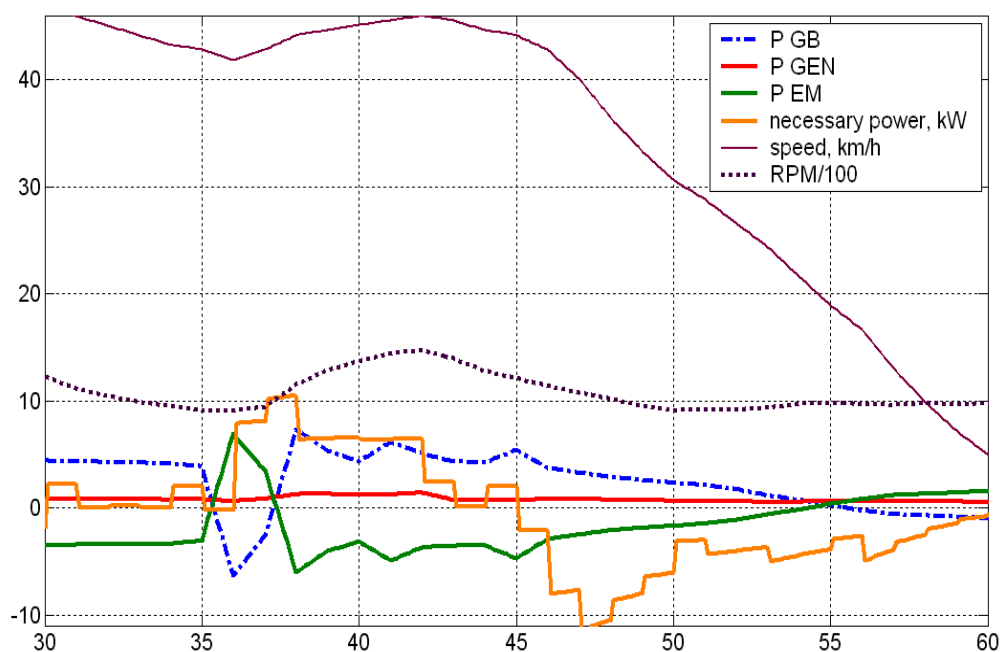
- Спільна робота електродвигуна і ДВЗ при рівномірному русі. Визначення синергетичного впливу електросилових агрегатів в процентному співвідношенні залежно від швидкості руху і запасу енергії в акумуляторі. Вимірюються потужність електродвигуна, обороти ДВЗ, витрата палива, швидкість руху, рециркуляція енергії генератора.

- Визначається яка величина потужності йде на заряд АКБ, впливає на питому витрату палива.

- Спільна робота електродвигуна і ДВЗ при прискоренні відповідному європейському міському циклу (до 1 м/с^2). Визначення процентного впливу ДВЗ і електродвигуна на потужні показники силової установки.

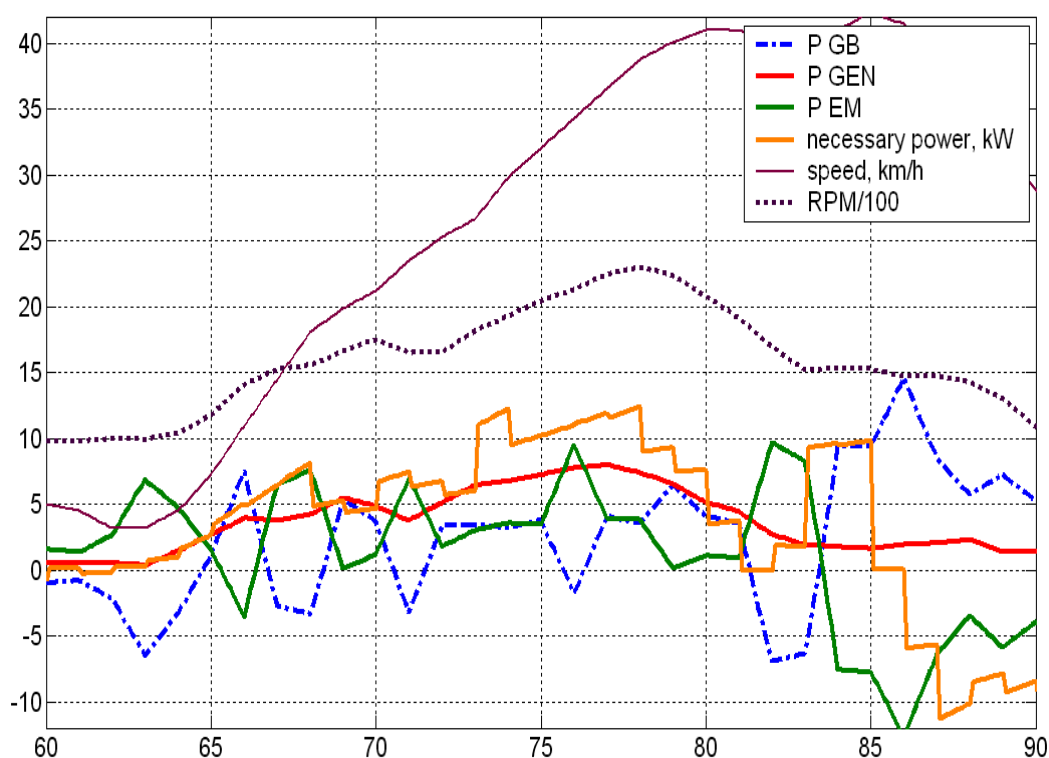
- Спільна робота електродвигуна і ДВЗ при максимальному прискоренні. Вимірюються потужності електромашин, обороти ДВЗ і прискорення автомобіля.

Типові приклади оброблених вимірювань розподілів потоків енергії при різних режимах руху (рис. 3.15 – 3.18), а також в додатку А1.



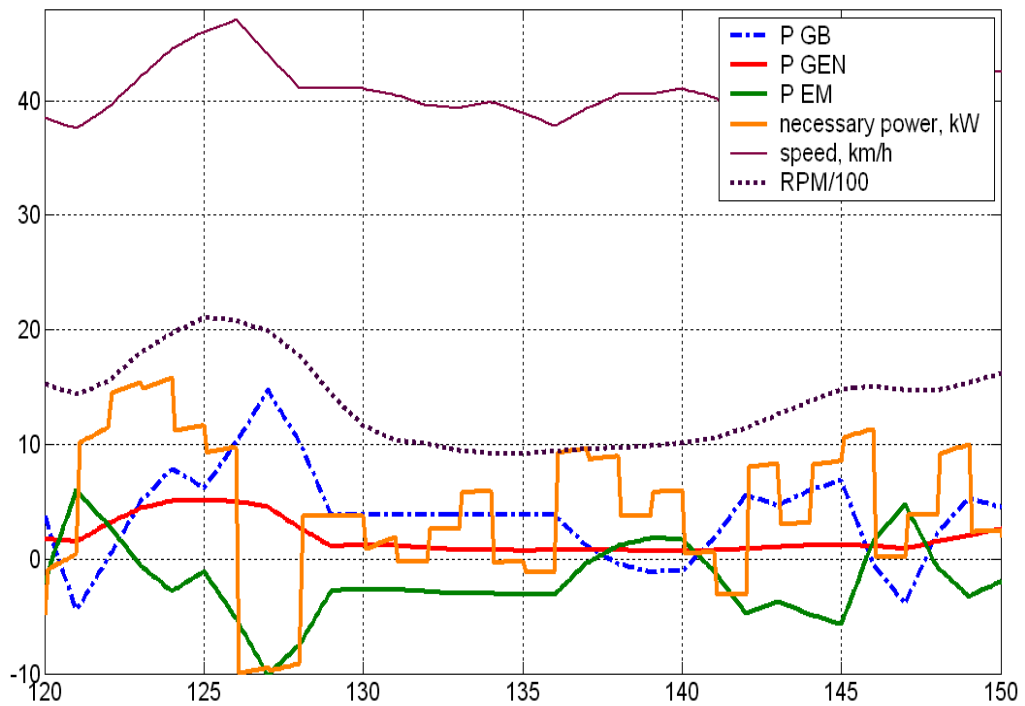
P GB – потужність АКБ, кВт; P GEN – потужність генератора, кВт; P EM – потужність електродвигуна, кВт; necessary power -потужність, необхідна для руху або яка повертається при рекуперації, кВт; speed - швидкість, км/ч; RPM/100 – обороти ДВЗ/100

Рисунок 3.15 – Розподіл потоків енергії з 30 по 60 секунду руху



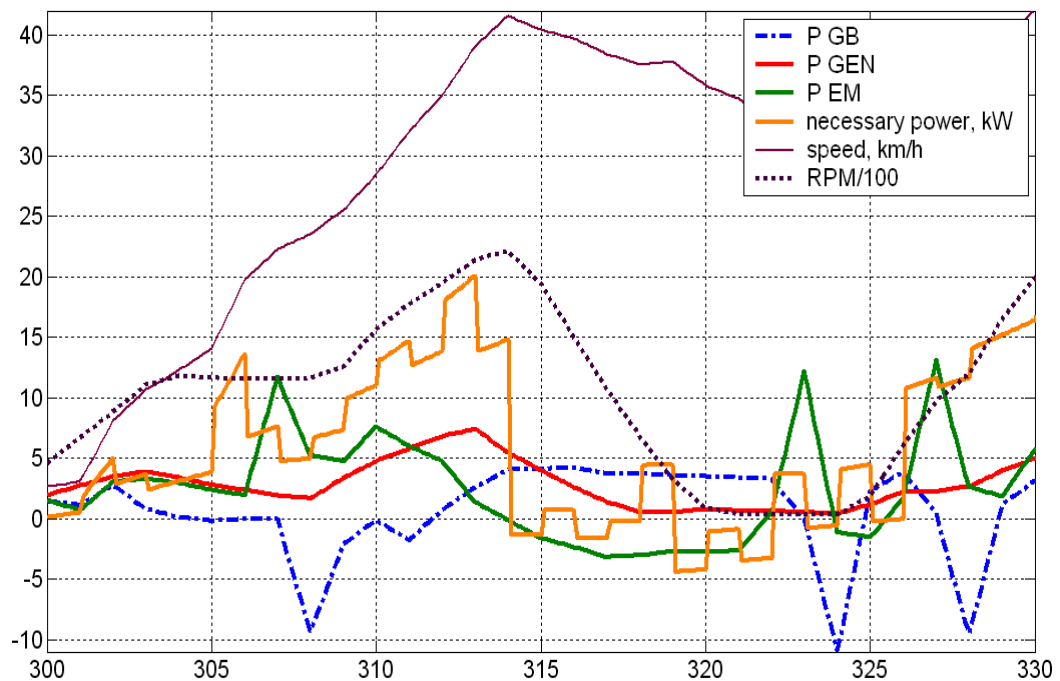
P GB – потужність АКБ, кВт; P GEN – потужність генератора, кВт; P EM – потужність електродвигуна, кВт; necessary power -потужність, необхідна для руху або яка повертається при рекуперації, кВт; speed - швидкість, км/ч; RPM/100 – обороти ДВЗ/100

Рисунок 3.16 – Розподіл потоків енергії з 60 по 90 секунду руху



P_{GB} – потужність АКБ, кВт; P_{GEN} – потужність генератора, кВт; P_{EM} – потужність електродвигуна, кВт; necessary power -потужність, необхідна для руху або яка повертається при рекуперації, кВт; speed - швидкість, км/ч; RPM/100 – обороти ДВЗ/100

Рисунок 3.17 – Розподіл потоків енергії з 120 по 150 секунду руху



P_{GB} – потужність АКБ, кВт; P_{GEN} – потужність генератора, кВт; P_{EM} – потужність електродвигуна, кВт; necessary power -потужність, необхідна для руху або яка повертається при рекуперації, кВт; speed - швидкість, км/ч; RPM/100 – обороти ДВЗ/100

Рисунок 3.18 – Розподіл потоків енергії з 300 по 330 секунду руху.

Дослідження проведені на автомобілі “Prius” показали, що для руху в міському циклі до швидкості 40 км/год. з акумуляторної батареї відбирається потужність у середньому 15 кВт при прискоренні до 1 м/сек².

Для визначення експериментальних залежностей кількості палива, що вприскується кожною форсункою за певний період часу ми отримаємо залежність дійсної кількості палива від часу вприскування форсунок при певних обертах колінчастого вала в межах 1000...3000 об/хв. При цьому, тиск вприскування кожної форсунки є однаковим при дослідженнях.

При визначенні залежності кількості палива від часу вприску, при обертах колінчастого валу 3000 об/хв. максимальний час роботи форсунок становить 20 сек. з періодичністю фіксації 10 сек. (рис. 3.19, табл. 3.1).

При визначенні залежності кількості палива від часу вприску, при обертах колінчастого валу 2000 об/хв. відповідно час (наповнюваності) більший з періодичністю фіксації 15 сек. (рис. 3.20, табл. 3.2).

При визначенні залежності кількості палива від часу вприску, при обертах колінчастого валу 1000 об/хв. відповідно час (наповнюваності) більший з періодичністю фіксації 30 сек. (рис. 3.19, табл. 3.1), адже метою дослідів є визначення експериментальної залежності кількості палива, що вприскується кожною форсункою за певний період часу.

Оскільки тиск вприскування кожної форсунки є однаковим, в результаті дослідження отримаємо залежність дійсної кількості палива від часу вприскування форсунок при певних обертах колінчастого вала (імітованих).

При дослідженнях велися візуальні спостереження за характеристикою якості розпилення пального та конусом розпилення кожної електромагнітної форсунки.

При визначенні залежності кількості палива від часу вприску, при обертах колінчастого валу 2000 об/хв. відповідно час (наповнюваності) більший з періодичністю фіксації 15 сек., що показано в таблиці 3.2 (рисунок 2, дослід 2).

Таблиця 3.1

Залежність кількості палива від часу впорскування, при обертах
колінчастого валу 3000 хв^{-1}

Форсунка	t, с	
	Дійсна кількість палива, що вприскується форсунками, мл	
	10	20
Форсунка №1 (тиск впорскування 1,5 Атм)	8,2	12,8
Форсунка №2 (тиск впорскування 1,5 Атм)	3,4	8,6
Форсунка №3 (тиск впорскування 1,5 Атм)	4,8	5,6
Форсунка №4 (тиск впорскування 1,5 Атм)	7,8	11,8

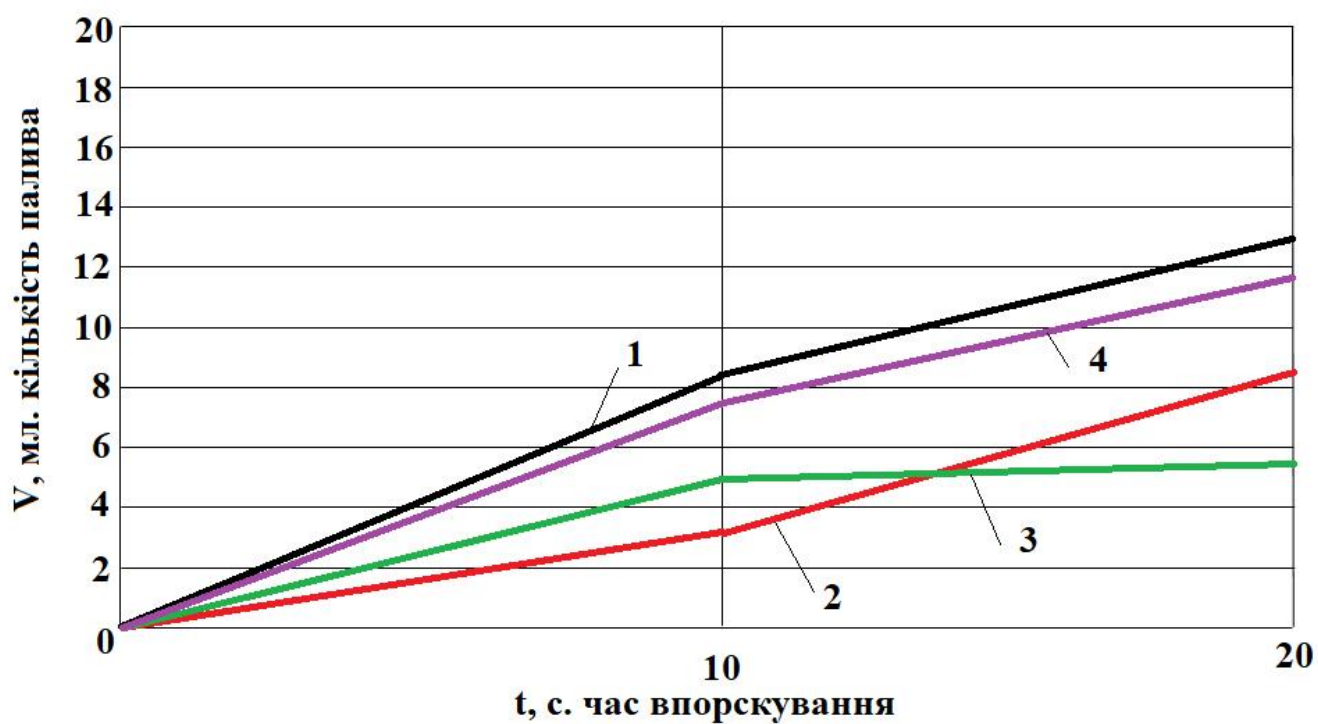


Рисунок 3.19 – Графік залежності кількості палива від часу впорскування при
обертах колінчастого валу 3000 хв^{-1}

Таблиця 3.2

Залежність кількості палива від часу впорску, при обертах колінчастого валу
2000 хв⁻¹

Форсунка	t, с	
	Дійсна кількість палива, що впорскується форсунками, мл	
	15	30
Форсунка №1 (тиск впорскування 1,5 Атм)	9,8	15
Форсунка №2 (тиск впорскування 1,5 Атм)	3,8	6
Форсунка №3 (тиск впорскування 1,5 Атм)	5,6	6,6
Форсунка №4 (тиск впорскування 1,5 Атм)	8,2	11,4

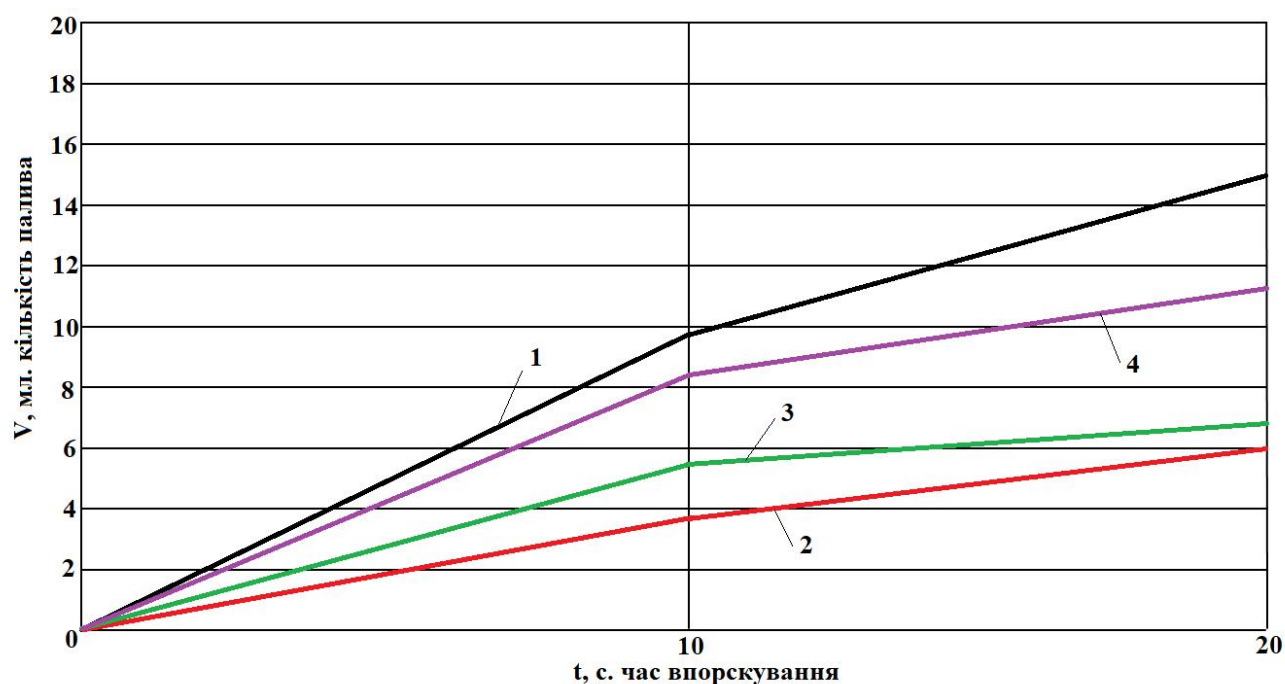


Рисунок 3.20 – Графік залежності кількості палива від часу впорскування при обертах колінчастого валу 2000 хв⁻¹

При визначенні залежності кількості палива від часу впорску, при обертах колінчастого валу 1000 об/хв. відповідно час (наповнюваності) більший з періодичністю фіксації 30 сек., що показано в таблиці 3.3 (рис. 3.21, дослід 1).

Таблиця 3.3

Залежність кількості палива від часу впорскування, при обертах
колінчастого валу 2000 хв^{-1}

Форсунка	t, с	
	Дійсна кількість палива, що вприскується форсунками, мл	
	30	60
Форсунка №1 (тиск впорскування 1,5 Атм)	9	14,4
Форсунка №2 (тиск впорскування 1,5 Атм)	4,6	15
Форсунка №3 (тиск впорскування 1,5 Атм)	4,2	7,6
Форсунка №4 (тиск впорскування 1,5 Атм)	8,4	11,8

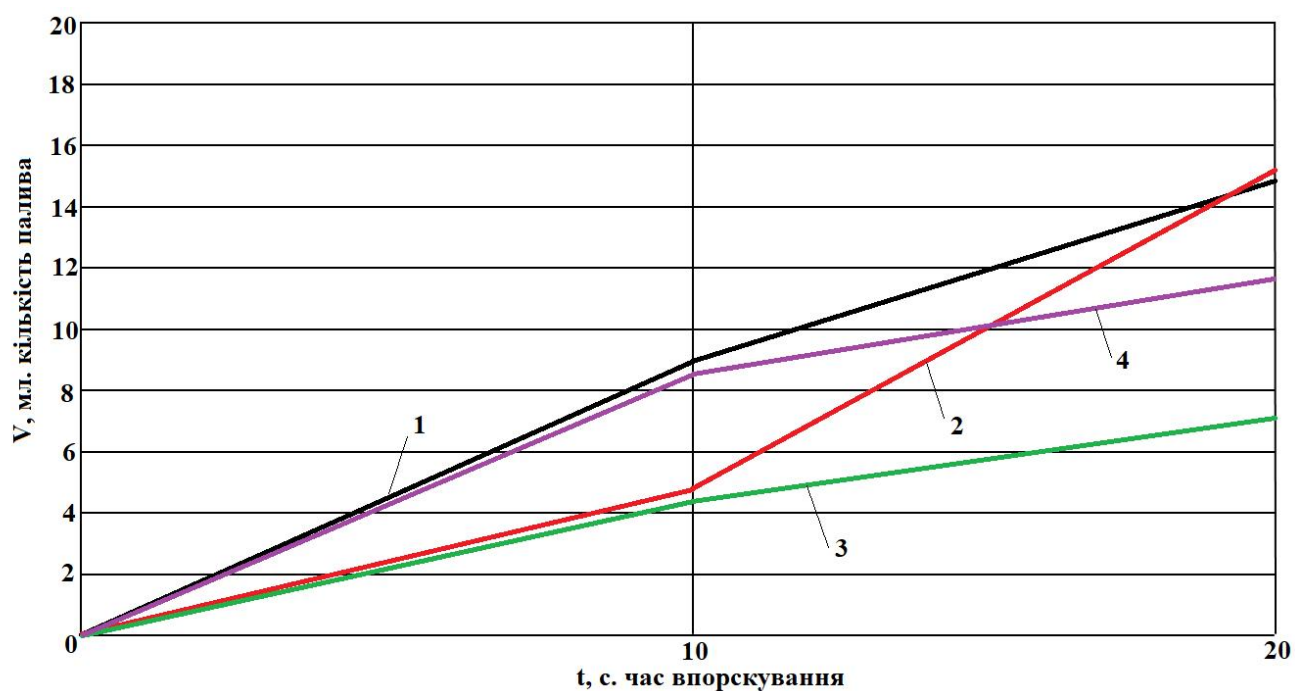


Рисунок 3.21 – Графік залежності кількості палива від часу впорскування при
обертах колінчастого валу 2000 хв^{-1}

Метою досліджень є визначення експериментальних залежностей кількості палива, що вприскується кожною форсункою за певний період часу. Оскільки тиск впорскування кожної форсунки є однаковим, в результаті

досліджень ми отримали залежності дійсної кількості палива від часу впорскування форсунок при певних обертах колінчастого валу (імітованих).

Метою досліджень «змішаного циклу» є визначення впорску палива в змішаному циклі роботи, оберти змінюються протягом деякого часу (плавно збільшуються відповідно від обертів холостого ходу в межах $n = 900 \dots 2000$. При цьому максимальний час роботи форсунок 40 сек. Збільшення обертів здійснюється за допомогою модулятора (регулятора імпульсів), а значення спостерігається на тахометрі панелі приладів. (Таблиця 3.4, Дослід 4, рисунок 3.22)

Таблиця 3.4

Залежність кількості палива від часу впорску в змішаному циклі
до 2000 хв^{-1}

Форсунка	t, с			
	Дійсна кількість палива, що впорскується форсунками, мл			
	15	20	30	40
Форсунка №1 (тиск впорскування 1,5 Атм)	6,8	10,8	11	14,2
Форсунка №2 (тиск впорскування 1,5 Атм)	7	10	10,8	13,8
Форсунка №3 (тиск впорскування 1,5 Атм)	5,4	7,4	8,6	11,6
Форсунка №4 (тиск впорскування 1,5 Атм)	6,4	8,6	9,6	12,4

При визначенні залежності кількості палива від часу впорскування в змішаному циклі більше 2000 об/хв. ($n = 2000 \dots 3000$), час роботи форсунок як і в попередньому дослідженні максимальні 40 сек. (Таблиця 3.5, Дослід 5, рисунок 3.23)

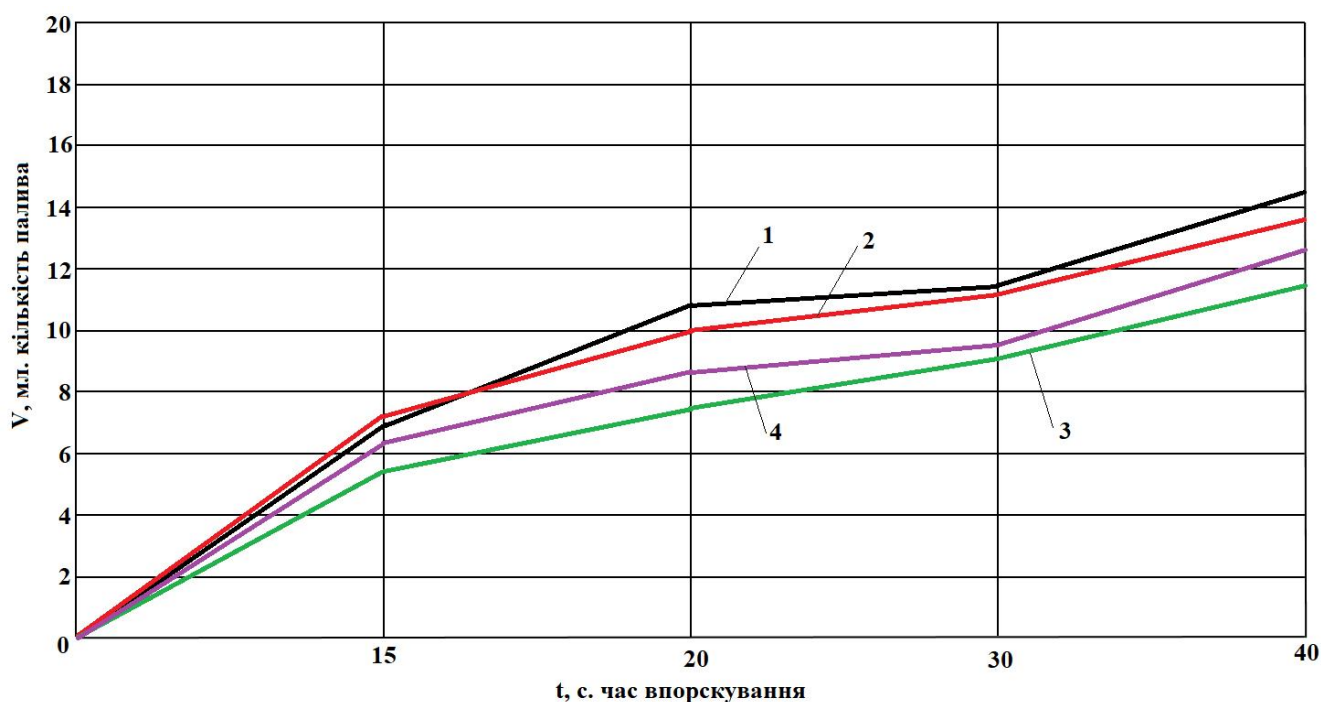


Рисунок 3.22 – Графік залежності кількості палива від часу впорскування в змішаному циклі до 2000 хв^{-1} обертах колінчастого валу

Таблиця 3.5

Залежність кількості палива від часу впорскування в змішаному циклі більше 2000 хв^{-1}

Форсунка	t, с			
	Дійсна кількість палива, що впорскується форсунками, мл			
	15	20	30	40
Форсунка №1 (тиск впорскування 1,5 Атм)	9,3	11,7	13,4	16,1
Форсунка №2 (тиск впорскування 1,5 Атм)	8,6	13,2	12,4	15,6
Форсунка №3 (тиск впорскування 1,5 Атм)	10,7	10	8,8	12,5
Форсунка №4 (тиск впорскування 1,5 Атм)	8,9	8	10,9	13,3

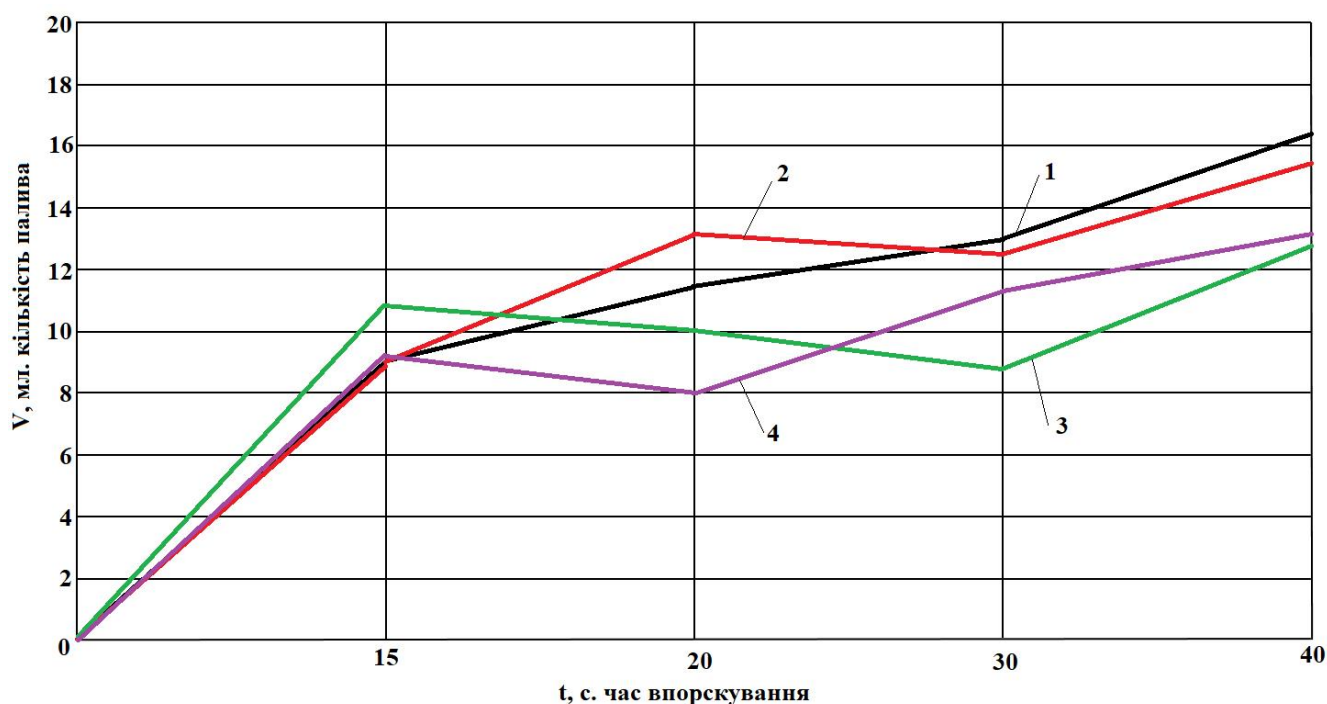


Рисунок 3.23 – Графік залежності кількості палива від часу впорскування

3.3. Висновки до розділу

1. Визначено та проаналізовано продуктивність подачі палива окремими форсунками при різних імітованих частотах обертання колінчастого валу ДВЗ. Отримані показники продуктивності роботи електромагнітних форсунок вказують на потребу їх дефектування або відновлення пропускнуої здатності.

2. Інформаційно-вимірювальний комплекс досліджень робочих процесів гібридної силової установки розроблено для вивчення особливостей роботи ДВЗ та тягової акумуляторної батареї на базі експериментального гібридного автомобіля. Даний комплекс забезпечує реєстрацію, первинну обробку та збереження в пам'яті комп'ютера діагностичних параметрів, які визначають технічний стан ДВЗ та тягової акумуляторної батареї.

3. Одним із підходів підвищення ефективності діагностування технічного стану гібридної силової установки є розробка і впровадження для визначення технічного стану інтелектуальної інформаційно-керуючої системи інваріантної різним гібридним автомобілям, що дозволяє оперативно усунути несправності, що мінімізує енерго- або ресурсоспоживання в заданих умовах експлуатації. .
Результати досліджень третього розділу роботи опубліковані [1,2, 5, 16-20].

РОЗДІЛ 4.1 РЕКОМЕНДАЦІЇ ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Приклади ефективного діагностування гібридної силової установки

ГСУ як об'єкт управління характеризується змінною структурою, суттєвою нелінійністю основних своїх елементів, параметричною невизначеністю. Ефективність застосування ГСУ значною мірою визначається характеристиками її системи автоматичного управління (САУ), яка повинна вирішувати наступні основні задачі

- ідентифікація поточного стану елементів ГСУ;
- ідентифікація і прогнозування тягово-швидкісного режиму руху автомобіля;
- вибір оптимального режиму роботи (варіанту кінематичної схеми) ГСУ залежно від її поточного стану і режиму руху ТЗ;
- оптимальний перерозподіл потоків потужності між агрегатами ГСУ на всіх тягово-швидкісних режимах, що задаються;
- управління рекуперацією енергії гальмування ТЗ;
- управління заряджанням і витрачанням енергії накопичувача;
- забезпечення стоп-стартового режиму, що мінімізує використання холостого ходу ДВЗ при короткочасних зупинках ТЗ;
- стабілізація заданих режимів роботи окремих агрегатів;
- забезпечення інтерфейсу водія, що імітує управління традиційним ТЗ.

Задачі, що вирішуються САУ ГСУ, мають ієрархічну організацію.

Першому рівню ієрархії відповідають задачі стабілізації заданих режимів роботи окремих агрегатів, що входять до складу ГСУ, а також забезпечення необхідної якості перехідних процесів. При цьому закони регулювання повинні характеризуватися достатньою грубістю до зміни параметрів відповідних об'єктів регулювання або мати можливість адаптації. Вирішення даних задач

покладається на локальні регулятори відповідних агрегатів: САУ ДВЗ, регулятор частоти обертання тягового електроприводу, блок управління рекуперацією енергії і так далі.

До другого рівня ієрархії відносяться завдання вибору оптимальних режимів роботи і особливостей взаємодії агрегатів і підсистем ГСУ, перерозподіл потоків потужності між агрегатами залежно від поточного стану ГСУ, режиму руху ТЗ, управляючих і збурюючих впливів. При цьому повинен забезпечуватися найбільш економічний і екологічно безпечний режим роботи ДВЗ, а також достатній запас енергії в накопичувачі для парирування пікових навантажень за допомогою допоміжного двигуна. Заряджання накопичувача може здійснюватися або за наявності надлишку потужності основного двигуна, або шляхом рекуперації енергії гальмування транспортного засобу.

До третього рівня ієрархії можна віднести завдання забезпечення інтерфейсу водія, що імітує управління традиційним транспортним засобом і, в той же час, що забезпечує відображення поточного стану і режиму роботи ГСУ. Дане завдання має відношення до САУ ГСУ, оскільки управління гібридним автомобілем здійснюється по концепції drive-by-wire, згідно якої водій управляє бортовим комп'ютером, а не безпосередньо силовою установкою. Особливості вирішення даної задачі диктуються ергономічними міркуваннями і не впливають на ефективність функціонування гібридної силової установки безпосередньо.

Завдання, віднесені до другого рівня ієрархії, що визначають стратегію управління ГСУ, є характерними саме для гібридних ТЗ, коли об'єктами управління є декілька джерел потужності в складній конфігурації. Ефективність гібридного автомобіля вирішальним чином залежить від відповідності вибраного режиму роботи ГСУ тягово-швидкісному режиму руху, а також від якості управління перерозподілом потоків потужності між основними агрегатами ГСУ. Цільовою функцією такого управління є мінімізація витрати палива і викидів токсичних компонентів з відпрацьованими газами ДВЗ при обмеженнях, обумовлених вимогами керованості, надійності, запасу енергії в ТАБ і так далі [25]. Часто рішення даної оптимізаційної задачі припускає перетворення

електричної потужності в еквівалентну кількість спалюваного палива для того, що б оцінити загальні витрати палива [12, 27]. Згодом оптимальний перерозподіл потужності між ДВЗ і електродвигуном здійснюється на підставі аналізу статичних карт питомої витрати палива ГСУ. Оптимізація перерозподілу потоків потужності актуальна, насамперед, для автомобілів з паралельною і послідовно-паралельною схемами побудови ГСУ.

У багатьох випадках задачі, характерні для другого рівня ієрархії допускають постановку в узагальненому вигляді і не вимагають конкретизації принципів функціонування допоміжного двигуна і контуру рекуперації енергії.

Існує три підходи до побудови САУ ГСУ, які розрізняються принципами вирішення задач, що відносяться до другого рівня ієрархії: використання логічних правил вибору стратегії, використання методів теорії оптимального управління і застосування алгоритмів адаптації до поточного їздового циклу і очікуваних змін.

Найбільше поширення на сьогоднішній день набули САУ, які реалізують метод використання логічних правил вибору стратегії управління ГСУ, хоч вони і не дозволяють в повній мірі виявити всі переваги гібридних технологій.

Спрощений змістовний опис алгоритму логічного вибору впливів, що управляють, може бути представлений в наступному вигляді.

При гальмуванні, коли потрібний момент обертання ГСУ $M_{GSU.zd} < 0$:

– ДВЗ вимкнений, $\beta_D = -1$;

– передавальне відношення трансмісії на k -ому кроці управління $\gamma(k) = \gamma(k-1)$;

– при повністю зарядженій ТАБ, коли $\theta_{TAB} \geq \theta_{ex.max}$ рекуперативне гальмування не використовується $\beta_M = 0$. Сигнал управління гідравлічною системою гальмування:

$$\beta_T = \frac{-M_{GSU.zd}}{M_{trm.max}}; \quad (4.1)$$

– при не повністю зарядженій ТАБ, коли $\theta_{TAB} < \theta_{ex.max}$, обчислюється максимальний гальмівний момент ВЕД в генераторному режимі $M_{VD.min}^{ogr}$ з урахуванням конструктивних особливостей ВЕД і максимально допустимого струму зарядки ТАБ, відповідного її поточному стану:

$$M_{VD.min}^{ogr} = \max \left\{ \frac{P_{VD.TAB}}{\omega_M \cdot \eta_{VD}}, M_{VD}(\omega_M, \beta_M = -1) \right\}, \quad (4.2)$$

де $P_{VD.TAB} = (P_{TAB.chg.max} - P_{dop}) \cdot \eta_{inv}^{-1}$ – обмеження потужності ВЕД в генераторному режимі можливостями ТАБ; η_{VD} – ККД ВЕД; η_{inv} – ККД трифазного інвертора з ШИМ; $P_{TAB.chg.max} = (E_{TAB} - I_{TAB.chg.max} \cdot R_{TAB}) \cdot I_{TAB.chg.max}$ – потужність, що надходить в ТАБ при зарядці максимально-допустимим струмом; P_{dop} – потужність, споживана від бортової мережі додатковим електроустаткуванням; $I_{TAB.chg.max}$ – максимальний струм заряду ТАБ; R_{TAB} – еквівалентний внутрішній опір ТАБ; E_{TAB} – еквівалентна ЕДС ТАБ.

Якщо $M_{GSU.zd} > (M_{VD.min}^{ogr} \cdot \gamma_M)$, гідравлічна система гальмування не використовується $\beta_T = 0$, гальмівне зусилля створюється за допомогою ВЕД:

$$\beta_M = \frac{M_{GSU.zd}}{M_{VD.max} \cdot \gamma_M}. \quad (4.3)$$

Якщо $M_{GSU.zd} \leq (M_{VD.min}^{ogr} \cdot \gamma_M)$, використовується максимальний гальмівний момент ВЕД в генераторному режимі: $\beta_M = -1$. Нестача гальмівного моменту доповнюється за рахунок гідравлічної системи гальмування:

$$\beta_T = \frac{M_{VD}(\omega_M, \beta_M) \cdot \gamma_M - M_{GSU.zd}}{M_{trm.max}}. \quad (4.4)$$

При необхідному моменті обертання ГСУ $M_{GSU.zd} \geq 0$:

- гідравлічна система гальмування не використовується $\beta_T = 0$;
- вибір передаточного відношення трансмісії на k -ому кроці діагностування при $\beta_D(k) \neq -1$ виконується виходячи з таких правил:

$$\gamma = \gamma_1 \quad \text{і} \quad \text{д} \text{е} \quad \omega < (\omega_{p,1} - \Delta\omega_p) \vee \\ \vee (\omega < (\omega_{p,1} + \Delta\omega_p)) \wedge \gamma(k-1) > \gamma_2 ; \quad (4.5)$$

$$\gamma = \gamma_2 \quad \text{і} \quad \text{д} \text{е} \quad ((\omega_{p,1} - \Delta\omega_p) \leq \omega < (\omega_{p,1} + \Delta\omega_p)) \wedge (\gamma(k-1) \leq \gamma_2) \vee \\ \vee (\omega_{p,1} + \Delta\omega_p) \leq \omega < (\omega_{p,2} - \Delta\omega_p) \vee \\ \vee ((\omega_{p,2} - \Delta\omega_p) \leq \omega < (\omega_{p,2} + \Delta\omega_p)) \wedge (\gamma(k-1) > \gamma_3) ; \quad (4.6)$$

$$\gamma = \gamma_3 \quad \text{і} \quad \text{д} \text{е} \quad ((\omega_{p,2} - \Delta\omega_p) \leq \omega < (\omega_{p,2} + \Delta\omega_p)) \wedge (\gamma(k-1) \leq \gamma_3) \vee \\ \vee (\omega_{p,2} + \Delta\omega_p) \leq \omega < (\omega_{p,3} - \Delta\omega_p) \vee \\ \vee ((\omega_{p,3} - \Delta\omega_p) \leq \omega < (\omega_{p,3} + \Delta\omega_p)) \wedge (\gamma(k-1) > \gamma_4) ; \quad (4.7)$$

$$\gamma = \gamma_4 \quad \text{і} \quad \text{д} \text{е} \quad ((\omega_{p,3} - \Delta\omega_p) \leq \omega < (\omega_{p,3} + \Delta\omega_p)) \wedge \gamma(k-1) \leq \gamma_4 \vee \\ \vee (\omega_{p,3} + \Delta\omega_p) \leq \omega < (\omega_{p,4} - \Delta\omega_p) \vee \\ \vee ((\omega_{p,4} - \Delta\omega_p) \leq \omega < (\omega_{p,4} + \Delta\omega_p)) \wedge (\gamma(k-1) > \gamma_5) ; \quad (4.8)$$

$$\gamma = \gamma_5 \quad \text{і} \quad \text{д} \text{е} \quad ((\omega_{p,4} - \Delta\omega_p) \leq \omega) \wedge \gamma(k-1) \leq \gamma_5 \vee \\ \vee (\omega_{p,4} + \Delta\omega_p) \leq \omega , \quad (4.9)$$

де $\mathbf{\omega}_p = [\omega_{p,1}, \omega_{p,2}, \omega_{p,3}, \omega_{p,4}]$ – вектор порогових швидкостей руху автомобіля, який визначається на підставі залежності ефективного ККД ДВЗ від його тягово-швидкісного режиму.

При $\beta_D(k-1) > 0,5$ вектор $\mathbf{\omega}_p$ помножується на поправочний коефіцієнт $K_{pp}(k) = 1 + 0,58 \cdot (\beta_D(k-1) - 0,5)$, що враховує навантаження ДВЗ; $\Delta\omega_p$ – приріст порогових швидкостей, що дозволяє уникнути «брязкоту» перемикання

передач. При $\beta_D(k) = -1$, коли ДВЗ відключений, передаточне відношення не змінюється: $\gamma(k) = \gamma(k-1)$;

– якщо виконується умова $(\omega < \omega_{P.DVS}) \wedge (\theta_{TAB} > \theta_{ex.min})$, де $\omega_{P.DVS}$ – порогова швидкість включення ДВЗ, рух здійснюється за допомогою тягового електродвигуна за наявності достатнього запасу енергії в ТАБ.

Максимально можливий момент обертання ВЕД з урахуванням обмежень його конструктивних особливостей і стану ТАБ може бути отриманий із виразу:

$$M_{VD.max}^{ogr} = \min \left\{ \frac{P_{VD.TAB} \cdot \eta_{VD}}{\omega_M}, M_{VD}(\omega_M, \beta_M = 1) \right\}, \quad (4.10)$$

$$\text{де } P_{VD.TAB} = (P_{TAB.max} - P_{dop}) \cdot \eta_{inv}; \quad P_{TAB.max} = \frac{E_{TAB}^2}{4 \cdot R_{TAB}}.$$

У випадку, коли $M_{GSU.zd} \leq (M_{VD.max}^{ogr} \cdot \gamma_M)$ сигнал управління тяговим електроприводом $\beta_M = M_{GSU.zd} / (M_{VD.max} \cdot \gamma_M)$, а сигнал управління потужністю ДВЗ відповідає його вимкненому стану $\beta_D = -1$.

При $M_{GSU.zd} > (M_{VD.max}^{ogr} \cdot \gamma_M)$ електропривод переймає на себе максимально-можливе навантаження: $\beta_M = 1$, а нестача потужності доповнюється за рахунок ДВЗ:

$$\beta_D = M_{DVS}^{-1}(\omega_{KV}, M_{DVS.zd}), \quad (4.11)$$

$$\text{де } M_{DVS.zd} = \frac{M_{GSU.zd} - M_{VD}(\omega_M, \beta_M) \cdot \gamma_M}{\gamma \cdot K_{scp}} - \text{необхідний ефективний момент ДВЗ;}$$

K_{scp} – коефіцієнт прослизання зчеплення.

$$K_{scp} = \begin{cases} 1, & \text{ї } \delta \text{è } \omega_{KV} \geq \omega_{KV.min} \\ \frac{\omega_{KV} \cdot (1 - K_{scp,0})}{\omega_{KV.min}} + K_{scp,0} & \text{ї } \delta \text{è } \omega_{KV} < \omega_{KV.min}; \end{cases} \quad (4.12)$$

$K_{scp,0}$ – коефіцієнт прослизання зчеплення при $\omega_{KV} = 0$.

При моделюванні ДВЗ у випадку $\omega \cdot \gamma < \omega_{KV.min}$ з урахуванням буксування муфти зчеплення вважатимемо, що $\omega_{KV} = \omega_{KV.min}$;

– якщо виконується умова $(\omega < \omega_{P.DVS}) \wedge (\theta_{TAB} \leq \theta_{ex.min})$, коли ТАБ розряджена, рух здійснюється за допомогою ДВЗ при відключеному електроприводі: $\beta_M = 0$.

В цьому випадку $\beta_D = M_{DVS}^{-1}(\omega_{KV}, M_{DVS.zd})$, де $M_{DVS.zd} = M_{GSU.zd} \cdot \gamma^{-1}$;

– при швидкості руху автомобіля, що перевищує порогову швидкість включення ДВЗ, коли виконується умова $\omega \geq \omega_{P.DVS}$, ВЕД використовується для наближення тягово-швидкісного режиму ДВЗ до області оптимальних режимів. Оптимальний момент обертання ДВЗ для поточної швидкості обертання КВ ω_{KV} знаходиться із умови:

$$M_{DVS}^* = M_{DVS}(\omega_{KV}, \beta_D^*), \beta_D^* = \arg \min_{\beta_D} \{g_e(\omega_{KV}, \beta_D)\}. \quad (4.13)$$

При виконанні умови $(M_{GSU.zd} \geq M_{DVS}^* \cdot \gamma) \vee (\theta_{TAB} \geq \theta_{ex.opt})$ відведення потужності від ДВЗ для заряджання ТАБ недоцільно.

Якщо $(M_{GSU.zd} > \gamma \cdot M_{DVS}(\omega_{KV}, \beta_D = 1)) \wedge (\theta_{TAB} \geq \theta_{ex.min})$, існує необхідність і можливість доповнити нестачу потужності ДВЗ за допомогою ВЕД. В цьому випадку сигнал управління потужністю ДВЗ приймається рівним $\beta_D = 1$, а сигнал управління потужністю ВЕД визначається із виразу:

$$\beta_M = \begin{cases} \frac{M_{VD.zd}}{M_{VD.max}} & \text{ї} \text{ } \delta \text{ } \epsilon \quad M_{VD.zd} < M_{VD.max}^{ogr} \\ 1 & \text{ї} \text{ } \delta \text{ } \epsilon \quad M_{VD.zd} \geq M_{VD.max}^{ogr}, \end{cases} \quad (4.14)$$

де

$$M_{VD.zd} = \frac{M_{GSU.zd} - \gamma \cdot M_{DVS}(\omega_{KV}, \beta_D)}{\gamma_M}, \quad (4.15)$$

$$M_{VD.max}^{ogr} = \min \left\{ \left(\frac{E_{TAB}^2}{4 \cdot R_{TAB}} - P_{dop} \right) \cdot \frac{\eta_{inv} \cdot \eta_{VD}}{\omega_M}, M_{VD}(\omega_M, \beta_M = 1) \right\}. \quad (4.16)$$

Інакше, коли виконується умова:

$$(M_{GSU.zd} \leq \gamma \cdot M_{DVS}(\omega_{KV}, \beta_D = 1)) \vee (\theta_{TAB} < \theta_{ex.min}), \quad (4.17)$$

рух здійснюється без використання тягового електроприводу: $\beta_D = 0$. Сигнал управління потужністю ДВЗ в цьому випадку $\beta_D = M_{DVS}^{-1}(\omega_{KV}, M_{DVS.zd})$, де

$$M_{DVS.zd} = \min \left\{ \frac{M_{GSU.zd}}{\gamma}, M_{DVS}(\omega_{KV}, \beta_D = 1) \right\}. \quad (4.18)$$

При виконанні умови $(M_{GSU.zd} < M_{DVS}^* \cdot \gamma) \wedge (\theta_{TAB} < \theta_{ex.opt})$ ДВЗ працює в оптимальному режимі, а надлишок потужності відводиться для заряджання ТАБ за допомогою використання ВЕД в режимі генератора.

В цьому випадку момент опору ВЕД, потрібний для забезпечення оптимального режиму ДВЗ:

$$M_{VD.zd} = \frac{M_{GSU.zd} - \gamma \cdot M_{DVS}^*}{\gamma_M}. \quad (4.19)$$

Обмеження даного моменту опору, обумовлене конструктивними особливостями ВЕД і максимально допустимим струмом зарядки ТАБ, відповідним її поточному стану:

$$M_{VD.min}^{ogr} = \max \left\{ \frac{P_{VD.TAB}}{\omega_M \cdot \eta_{VD}}, M_{VD}(\omega_M, \beta_M = -1) \right\}, \quad (4.20)$$

де

$$P_{VD.TAB} = \frac{(E_{TAB} - I_{TAB.chg.max} \cdot R_{TAB}) \cdot I_{TAB.chg.max} - P_{dop}}{\eta_{inv}}. \quad (4.21)$$

При $M_{VD.zd} > M_{VD.min}^{ogr}$ управляючі впливи на ВЕД і ДВЗ:

$$\beta_M = \frac{M_{VD.zd}}{M_{VD.max}}; \beta_D = M_{DVS}^{-1}(\omega_{KV}, M_{DVS}^*). \quad (4.22)$$

При $M_{VD.zd} \leq M_{VD.min}^{ogr}$ режим ДВЗ може відхилятися від оптимального із за обмежень області допустимих режимів ВЕД:

$$\beta_M = -1; \beta_D = M_{DVS}^{-1}(\omega_{KV}, M_{DVS.zd}), \quad (4.23)$$

де

$$M_{DVS.zd} = \min \left\{ \frac{M_{GSU.zd}}{\gamma}, M_{DVS}(\omega_{KV}, \beta_D = 1) \right\}. \quad (4.24)$$

Момент обертання ГСУ $M_{GSU.zd}$, потрібний для забезпечення заданого тягово-швидкісного режиму гібридного автомобіля, визначається з використанням ПІ-регулятора:

$$M_{GSU.zd}(k) = k_{p.V} \cdot e(k) + k_{i.V} \cdot \sum_{n=0}^k e(n), \quad (4.25)$$

де $e(k) = V_{zd}(k) - V(k)$ – помилка регулювання за швидкістю руху автомобіля;
 $k_{p.V}$, $k_{i.V}$ – параметри ПІ – регулятора.

4.2 Використання систем нечіткого висновку та штучних нейронних мереж для оцінки технічного стану гібридної силової установки

Ідентифікація нелінійної залежності $P_k = f(I_{st}, U_{ab}, n_{kv}, T_m)$ за експериментальними даними традиційними методами виявляється важко здійснюваним завданням і пов'язана зі значними складнощами при зборі достатнього обсягу даних і труднощами обчислювального характеру.

Разом з тим існують методи, що дозволяють успішно ідентифікувати залежності складних функцій на підставі експериментальних досліджень при обмеженій кількості даних. Серед таких підходів можна виділити використання штучних нейронних мереж і систем нечіткого виводу [33, 54]. До переваг останніх можна віднести можливість формалізації та використання апріорної інформації про досліджувані явища. Однак в даний час не існує обґрунтованих рекомендацій щодо застосовності конкретного методу. Для вибору найбільш обґрунтованого підходу до апроксимації необхідної залежності проведемо дослідження можливостей нечітких систем, штучних нейронних мереж і гібридних нейронних мереж.

Серед різних систем нечіткого виводу використовуємо систему Мамдані, як найбільш прозору з точки зору формулювання правил нечітких продукцій. Структуру моделі нечіткого висновку Мамдані показана на рис.4.1.

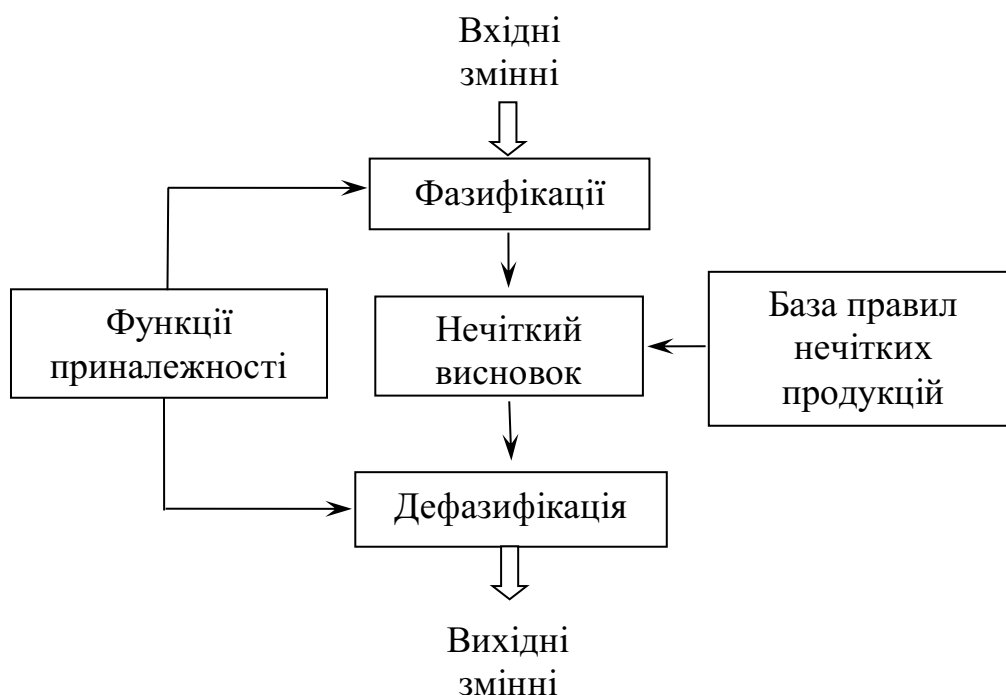


Рисунок 4.1. Структура нечіткої моделі Мамдані

Фазифікації вхідних змінних I_{st} , U_{ab} , n_{kv} , T_m , V_a виконується шляхом завдання їх терм-множини $I_{st} = \{L, LM, M, MB, B\}$, $U_{ab} = \{L, M, B\}$, $n_{kv} = \{L, M, B\}$, $T_m = \{L, M, B\}$, де термам присвоєні наступні значення: L – «мале», LM – «менше середнього», M – «середнє», MB – «більше середнього», B – «велике». Вихідної змінної системи є $P_k = \{L, LM, M, MB, B\}$. Терми можуть бути представлені нечіткими множинами, які використовують гауссову функцію приналежності:

$$\mu(u) = \exp\left(-\frac{(u-b)^2}{2c^2}\right), \quad (4.26)$$

де u – нормоване значення відповідної змінної; b – координата максимуму; c – коефіцієнт концентрації.

Перевагою даної функції приналежності є те, що для її завдання необхідно тільки два параметри: b і c .

Дефазифікація вихідних змінних, що полягає в перетворенні нечіткого безлічі в точну цифру, виконується за допомогою методу центру тяжіння:

$$\bar{P}_{k \text{ mod}} = \frac{\int_0^1 \bar{P}_k \mu_P(\bar{P}_k) d\bar{P}_k}{\int_0^1 \mu_P(\bar{P}_k) d\bar{P}_k}, \quad (4.27)$$

де $\bar{P}_k$ – нормоване значення вихідної змінної; $\mu_P(\bar{P}_k)$ – ступінь приналежності елемента $\bar{P}_k$ нечітких множин.

Для синтезу нечіткої системи ідентифікації залежності $P_k = f(I_{st}, U_{ab}, n_{kv}, T_m)$ будемо використовувати метод двоетапної ідентифікації нелінійної залежності Ротштейна [34]. Згідно даного методу, спочатку формується база нечітких правил виду «Якщо щось» (структурна ідентифікація), після чого виконується параметрична ідентифікація залежності шляхом знаходження таких ваг правил і параметрів функцій належності нечітких термів, які мінімізують відхилення результатів нечіткого моделювання від експериментальних даних.

Базу нечітких правил складемо на основі слабоформалізованих емпіричних знань про роботу ДВС при різних ступенях технічного стану. У табл.4.1. приведена отримана база, яка містить 127 правил.

Оскільки у всіх нечітких правилах як логічної зв'язки для під умови застосовується тільки нечітка кон'юнкція (зв'язка «І»), то в якості методу агрегування обрана операція min-кон'юнкції. При визначенні результату логічної кон'юнкції нечітких висловлювань і будемо використовувати вираз:

$$T(A \wedge B) = \min\{T(A), T(B)\}, \quad (4.28)$$

де $T(\bullet)$ – ступінь істинності відповідного висловлювання.

Для акумуляції висновків правил використовується метод max-диз'юнкції. При визначенні результату логічної диз'юнкції (зв'язка «АБО») нечітких висловлювань А і В будемо використовувати вираз:

$$T(A \vee B) = \max\{T(A), T(B)\}. \quad (4.29)$$

Для визначення ступеня істинності заперечення нечіткого висловлювання («НЕ») будемо використовувати вираз:

$$T(\bar{A}) = 1 - T(A). \quad (4.30)$$

Параметрична ідентифікація моделі виконується на масиві експериментальних даних, отриманих при дослідженні гібридної силової установки Toyota Prius.

Після попередньої обробки результатів експериментів з отриманих даних була сформована матриця, кожна з 313 рядків якої містить результати окремого виміру параметрів I_{st} , U_{ab} , n_{kv} , T_m і P_k , відповідних моменту руху до швидкості $0,3 V_{max}$. Масив даних був розділений на навчальну і контрольну вибірки щодо 2:1.

В якості вхідних змінних нечіткої моделі використовувалися нормовані значення $\bar{I}_{st}$, $\bar{U}_{ab}$, $\bar{n}_{kv}$, $\bar{T}_m$ з навчальної вибірки. Нормування, що мало на меті приведення значень вхідних змінних в інтервал $[0, 1]$, виконувалося відповідно до виразу:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - \min\{x\}}{\max\{x\} - \min\{x\}}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (4.31)$$

де $\bar{x}$ – нормоване значення параметра, x – виміряне значення параметра, $\min\{x\}$, – мінімальне і максимальне значення відповідного безлічі значень параметрів.

До отриманого на виході нечіткої системи нормованому значенню коефіцієнта технічного стану ГСУ застосовувалася операція денормування:

$$P_{k \text{ mod}} = \bar{P}_{k \text{ mod}} [\max\{P_k\} - \min\{P_k\}] + \min\{P_k\}, \quad (4.32)$$

де $P_{k \text{ mod}}$ – денормування значення коефіцієнта технічного стану ГСУ.

відповідність дійсних P_k і модельних $P_{k \text{ mod}}$ значень коефіцієнта технічного стану ГСУ на навчальній та контрольній вибірках показано на рис.4.2.

Таблиця 4.1

База правил нечітких продукцій

I_{st}	n_{kv}		L			LM			M			MB			B		
	U_{ab}	T_m	L	M	B	L	M	B	L	M	B	L	M	B	L	M	B
B	B		B	B	B	B	B	B	MB	B	B	MB	MB	B	M	MB	B
	M		B	B	B	MB	B	B	MB	B	B	MB	MB	B	M	MB	B
	L		B	B	B	MB	B	B	MB	MB	B	MB	MB	B	M	MB	MB
MB	B		MB	B	B	MB	MB	B	MB	MB	B	M	MB	MB	M	MB	MB
	M		MB	MB	B	M	MB	B	M	MB	MB	M	MB	MB	M	M	MB
	L		MB	MB	B	M	MB	MB	M	M	MB	M	M	MB	LM	M	MB
M	B		M	MB	MB	M	M	MB	M	M	MB	M	M	MB	LM	M	M
	M		M	MB	MB	M	M	MB	M	M	MB	M	M	MB	LM	LM	M
	L		M	M	MB	M	M	MB	M	M	MB	LM	M	M	LM	LM	M
LM	B		LM	M	MB	LM	M	M	LM	M	M	LM	LM	M	LM	LM	LM
	M		LM	M	M	LM	LM	M	LM	LM	M	LM	LM	M	L	LM	LM
	L		LM	LM	M	LM	LM	M	LM	LM	M	L	LM	LM	L	L	LM
L	B		LM	LM	M	L	LM	M	L	LM	LM	L	L	LM	L	L	L
	M		L	LM	M	L	LM	M	L	L	LM	L	L	LM	L	L	L
	L		L	LM	M	L	LM	LM	L	L	LM	L	L	L	L	L	L

Для оцінки якості синтезованої нечіткої моделі можна використовувати математичне очікування M_{P_k} і середньоквадратичне відхилення σ_{P_k} нев'язки між дійсними і модельованими величинами коефіцієнта технічного стану ГСУ. Для зручності порівняння отриманих результатів з результатами інших моделей були обчислені також їх відносні значення $M_{P_k\%}$ і $\sigma_{P_k\%}$:

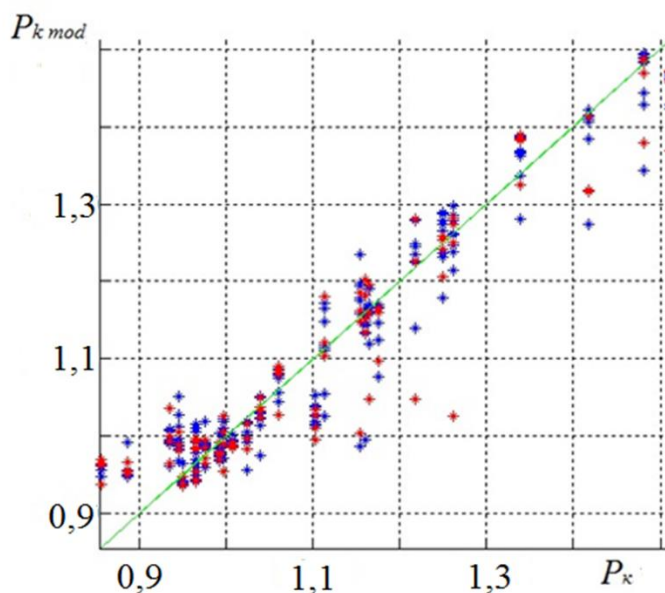


Рисунок 4.2. Тестування нечіткої моделі Мамдані до навчання

$$M_{P_k \%} = \frac{M_{P_k}}{\max\{P_k\} - \min\{P_k\}} \cdot 100\%, \quad (4.33)$$

$$\sigma_{P_k \%} = \frac{\sigma_{P_k}}{\max\{P_k\} - \min\{P_k\}} \cdot 100\%. \quad (4.34)$$

Значення цих величин, наведені в табл. 4.2, свідчать про недостатню якість створеної нечіткої моделі і необхідності її налаштування.

Таблиця 4.2

Значення математичного очікування і середньоквадратичного відхилення помилки для різних способів апроксимації залежності

$$P_k = f(I_{st}, U_{ab}, n_{kv}, T_m) \quad (4.35)$$

Методи		Навчальне підмножина				Контрольне підмножина			
		M_{P_k}	$M_{P_k \%}$, %	σ_{P_k}	$\sigma_{P_k \%}$, %	M_{P_k}	$M_{P_k \%}$, %	σ_{P_k}	$\sigma_{P_k \%}$, %
Модель Мамдані	до налаштування	0,937	1,43	0,209	13,2	0,89	2,42	0,714	32,75
	після налаштування	-1,75	-0,27	47,65	7,26	0,482	0,74	0,63	8,78
Нейронна мережа		0,03	0,004	28,42	4,05	0,463	0,71	0,50	5,41

Налаштування є знаходження таких параметрів функцій приналежності і таких вагових коефіцієнтів правил, які мінімізують відхилення між експериментальними значеннями коефіцієнта технічного стану ГСУ $\{P_k\}$ і значеннями $\{P_{k\text{mod}}\}$, отриманими за допомогою нечіткої моделі, на навчальній вибірці [3]. Велика кількість правил і неочевидність взаємозв'язків між параметрами дають підставу вважати, що використання стандартних функцій оптимізації краще «ручний» настройки системи.

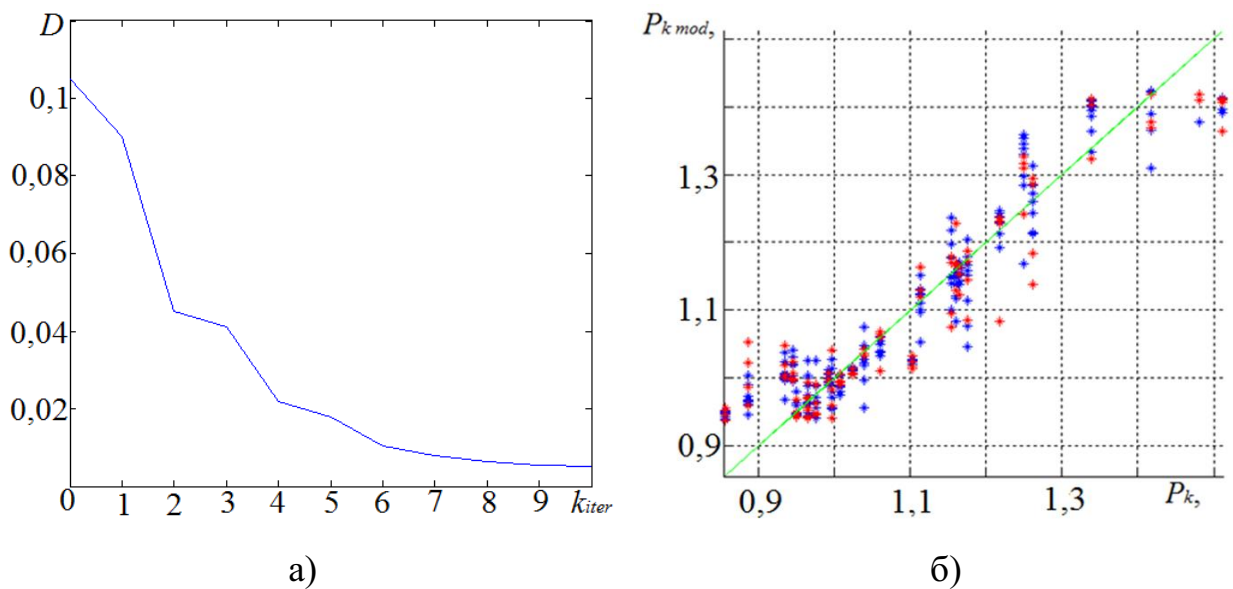
В даному випадку навчання нечіткої моделі було здійснено з використанням функції `fmincon` пакета `Optimization Toolbox`, яка призначена для вирішення завдань оптимізації методом нелінійного програмування і заснована на методі найменших квадратів. Зі збільшенням кількості ітерацій (в даному випадку виконувалося 10 ітерацій) середній квадрат помилки моделювання для нормованих значень коефіцієнта технічного стану ГСУ

$$D = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{P}_{k\text{mod}} - \bar{P}_k)^2, \quad (4.36)$$

де n – кількість точок в контрольній вибірці, змінюється в діапазоні 0,1048...0,0066 (см. рис. 4.3а).

В результаті настройки системи розкид точок $(P_k, P_{k\text{mod}})$ зменшився, що відображено на (рис.4.3 б) і свідчить про успішне завершення налаштування. Також значно зменшилися величини σ_{P_k} , характеризують нев'язку між експериментальними даними та результатами нечіткого моделювання на навчальній та контрольній вибірках (табл. 4.4).

Після серії проведених обчислювальних експериментів для вирішення даної задачі із застосуванням штучної нейронної мережі (ІНС) була обрана тришарова ІНС прямого поширення з наступною конфігурацією: перший прихований шар містить 10 нейронів, другий прихований шар – 4 нейрона (рис.4.4). Як активаційної функції першого і другого шарів використовується функція гіперболічного тангенса:



а) динаміка зміни середнього квадрата помилки в процесі настройки;

б) тестування нечіткої моделі після настройки

Рисунок 4.3 – Налаштування нечіткої моделі Мамдані

$$f(s) = th(s) = \frac{2}{1 + e^{-2 \cdot s}} - 1. \quad (4.37)$$

Третій, вихідний шар, має лінійну активаційну функцію.

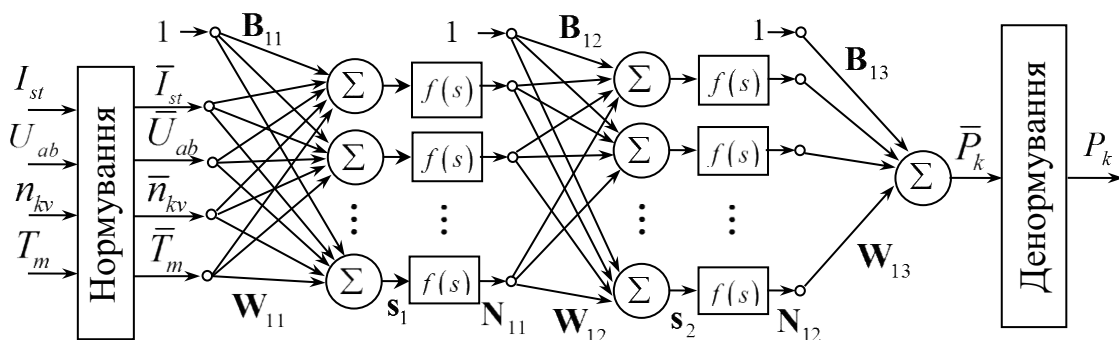


Рисунок 4.4 – Структурна схема штучної нейронної мережі

Функціонування нейронної мережі описується виразами:

$$\begin{cases} \mathbf{N}_{11} = 2 \cdot \left(1 + \exp \left(-2 \cdot \left(\mathbf{W}_{11} \cdot [\bar{I}_{st}, \bar{U}_{ab}, \bar{n}_{kv}, \bar{T}_m]^T + \mathbf{B}_{11} \right) \right) \right) - 1 \\ \mathbf{N}_{12} = 2 \cdot \left(1 + \exp \left(-2 \cdot \left(\mathbf{W}_{12} \cdot \mathbf{N}_{11} + \mathbf{B}_{12} \right) \right) \right) - 1 \\ [\bar{P}_k]^T = \mathbf{W}_{13} \cdot \mathbf{N}_{12} + \mathbf{B}_{13} \end{cases}, \quad (4.38)$$

де $\mathbf{N}_{11}$, $\mathbf{N}_{12}$ – вектори виходів нейронів першого і другого шарів відповідно; $\mathbf{W}_{11}$, $\mathbf{W}_{12}$, $\mathbf{W}_{13}$ – матриці вагових коефіцієнтів нейронів першого, другого і третього шарів відповідно; $\mathbf{B}_{11}$, $\mathbf{B}_{12}$, $\mathbf{B}_{13}$ – вектори зсувів нейронів першого, другого і третього шарів відповідно.

Нормування вхідних і денормування вихідних змінних здійснюється аналогічно попередньому випадку.

Для вирішення задачі параметричної ідентифікації можуть бути використані відомі методи навчання нейронних мереж [35, 46]. Одним з таких методів, який показав свою високу ефективність при вирішенні даної задачі, є алгоритм SCG (scaled conjugate gradient algorithm), запропонований Моллером (Moller). Цей алгоритм об'єднує ідеї методу сполучених градієнтів з квазіньютонівськими методами [57]. Алгоритм SCG може зажадати більшого числа ітерацій, ніж інші алгоритми методу сполучених градієнтів, але при цьому кількість обчислень на кожній ітерації істотно скорочено.

Одна з найбільш серйозних труднощів, що виникають при навчанні ІНС, пов'язана з явищем перенавчання (overfitting). Воно полягає в тому, що мережа мінімізує помилку на деякому обмеженому навчальній множині, що може привести до нестійкості результатів поза даного безлічі.

В дослідженні [75] стверджується, що перенавчання може наступити в тому випадку, коли кількість точок множини, на якому проводиться навчання нейронної мережі, $N < 30 \cdot k_F$, де k_F – кількість вільних параметрів мережі. Разом з тим необхідно враховувати, що крім структури ІНС і обсягу навчальної множини, на ефект перенавчання впливає також характер аппроксимууючої залежності і розподіл точок навчальної множини.

Для подолання ефекту перенавчання безліч вихідних даних може бути розділене на два підмножини: навчальне (training set) і контрольне (validation set). Навчання мережі здійснюється з використанням навчальної підмножини. Контрольне підмножина використовується тільки для контролю помилки навчання. На початковій фазі навчання помилка для контрольної підмножини

зменшується так само, як і для навчального підмножини. На певному етапі зменшення помилки для контрольної підмножини припиняється або вона починала зростати. У цей момент необхідно перервати процедуру навчання для запобігання явища перенавчання.

Якщо помилка для контрольної підмножини значно перевищує помилку для навчального підмножини, можна зробити висновок, що вихідні дані непередставницьким.

Навчання ІНС виконувалося на навчальній вибірці, що містить 208 вимірювань. У свою чергу контрольна вибірка містила 105 вимірювань. Тривалість навчання становила 525 епох. Результати функціонування навченої ІНС представлено на (рис.4.5).

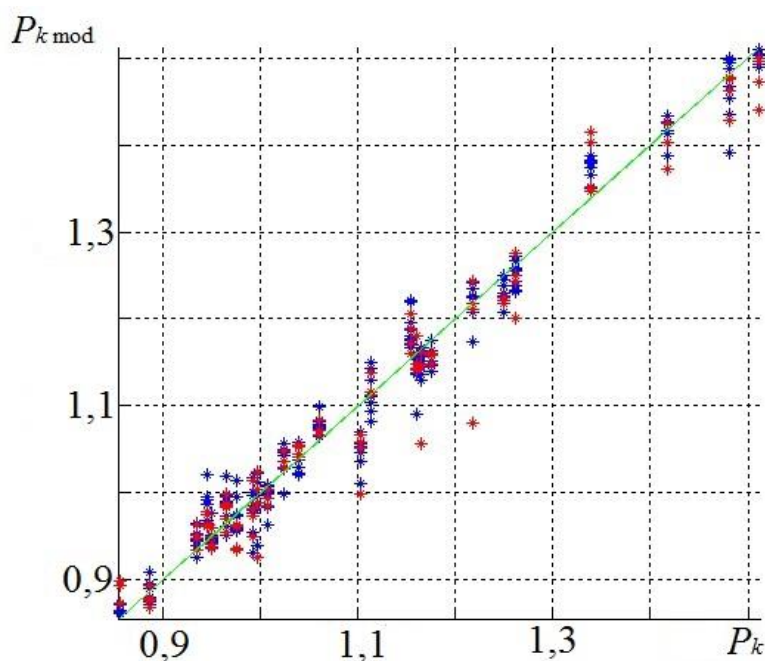


Рисунок 4.5. Результати функціонування штучної нейронної мережі

В результаті навчання ІНС середньоквадратичне відхилення помилки на контрольній вибірці досягло значення в 0,012 (5,41 %). Це істотно краще за показники помилки нечіткого моделювання (табл.4.4).

4.3. Висновки до розділу

1. Розроблено метод оцінки технічного стану ГСУ автомобіля, який використовує штучні нейронні мережі та системи нечіткого висновку для

ідентифікації залежності коефіцієнта технічного стану від діагностичних параметрів при діагностуванні.

2. Встановлено, що при використанні штучної нейронної мережі найкращі характеристики забезпечує тришарова мережа прямого розповсюдження, в першому скритому слої знаходиться 10 нейронів з сигмоїдальними активаційними функціями, а в другому – 4 нейрона.

3. Навчання нечіткої моделі виконано з використанням функції `fmincon` пакету Optimization Toolbox, яка використовується для рішення задач оптимізації методом нелінійного програмування та заснована на методі найменших квадратів. В результаті налагоджування системи розкид точок зменшився, що підтверджує якість налагоджування тестованої нечіткої моделі.

4. Навчання ШНМ виконувалася на навчальній виборці. Навчання мережі використовувалося з використанням навчальної множини. Контрольна підмножина використовувалася для контролю похибки навчання. В результаті навчання ШНМ середньоквадратичне відхилення похибки на контрольній виборці склало $0,012 K_p$ (5,41 %).

5. Результати досліджень четвертого розділу роботи опубліковані [4, 6, 11-14].

ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення ефективності діагностування технічного стану гібридної силової установки шляхом використання штучної інтелектуальної мережі. Результати досліджень дозволили сформулювати основні теоретичні та науково-практичні висновки.

Основні наукові й прикладні результати досліджень:

1. В дисертаційній роботі вирішена задача підвищення ефективності експлуатації функціональних систем гібридної силової установки на підставі нової концепції діагностування технічного стану гібридних автомобілів, забезпечуючи єдиний підхід к дослідженню діагностичних параметрів в залежності від схеми будови та конструктивних особливостей ГСУ, яка використовує нейромережеву апроксимацію характеристики діагностичних параметрів при використанні енергетичних показників.

2. Ефективність діагностування технічного стану гібридного автомобіля значно залежить від обраної стратегії управління ГСУ – відповідно її режиму роботи та управління розподілом енергії між ДВЗ, тягової акумуляторної батареї в залежності від технічного стану складових автомобіля. Це визначає необхідність розробки нових методів діагностування технічного стану ГСУ на підставі сучасних досягнень інформаційних технологій.

3. Визначена формальна постановка оптимізаційної задачі визначення технічного стану ГСУ з векторним функціоналом якості управління, що включає критерії вантажно-швидкісного режиму, якості зміни технічного стану ТАБ, економічності ДВЗ за енергетичними показниками. Надано використання принципу гарантованого результату та лінійного звернення векторного критерія в суперкритерій для визначення технічного стану ГСУ на множині парето-оптимальних управлінь при нерівних критеріях оптимальності.

4. Розроблено теоретичні основи структурної та параметричної ідентифікації математичної моделі технічного стану ГСУ. Отримано нейромережеву модель діагностування технічного стану ГСУ, яка визначає залежність критерія показника ресурсу від енергетичних витрат автомобіля.

Швидкість руху автомобіля, напруга і струм ТАБ, час впорскування палива форсункою та швидкість обертання колінчастого вала ДВЗ є енергетичними показниками діагностування технічного стану ГСУ.

5. Експериментально підтверджено ефективність використання енергетичного підходу для діагностування технічного стану ГСУ та науково обґрунтовано діагностичні параметри ДВЗ і ТАБ на підставі розрахункового експерименту та дорожніх випробувань гібридного автомобіля.

6. Розроблено лабораторний стенд для визначення характеристик подачі палива та електричних параметрів електромагнітних форсунок розподіленої системи впорскування ДВЗ гібридного автомобіля. В основі стенда використано елементи електронних систем керування роботою ДВЗ систему впорскування Multec-S. За результатами стендових досліджень встановлено значну розбіжність (близько 50 %) у подачі палива окремими форсунками на усіх режимах роботи.

7. Розроблено метод діагностики технічного стану ГСУ, який використовує штучні нейронні мережі та системи нечіткого висновку для ідентифікації коефіцієнта технічного стану ДВЗ та тягової акумуляторної батареї. Встановлено, що при використанні штучної нейронної мережі найкращі характеристики забезпечує тришарова мережа прямого розповсюдження, в першому скритому слої знаходиться 10 нейронів з сигмоїдальними активаційними функціями, а в другому – 4 нейрона.

8. Навчання штучної нейронної мережі виконувалося на навчальній виборці з використанням навчальної множини. Контрольна підмножина використовувалася для контролю похибки навчання. В результаті налагоджування системи розкид точок експериментальних і розрахункових зменшився, що підтверджує якість налагоджування тестованої нечіткої моделі. В результаті навчання ШНМ середньоквадратичне відхилення похибки на контрольній виборці склало $0,012 K_p$ (5,41 %).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Марціяш О. М., Мурований І. С., Заверуха Р. Р. Визначення характеристик роботи електромагнітних форсунок бензинового двигуна на лабораторному стенді. *Наукові нотатки* : міжвуз. зб. наук. пр. Луцьк, 2016. Вип. 55. С. 237–240.
2. Марціяш О. М., Заверуха Р. Р., Ужва А. В. Аналіз моделей стендів для дослідження параметрів системи керування бензинових ДВЗ легкових автомобілів. *Автомобільний транспорт* : зб. науч. пр. / Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків, 2017. Вип. 41. С. 61–66.
3. Бажинов О. В., Бажинова Т. О., Заверуха Р. Р. Інформаційна комплексна система діагностики гібридних і електромобілів. *Інженерія природокористування*. Харків, 2020. № 2 (16). С. 12–18.
4. Бажинов О. В., Заверуха Р. Р. Діагностика функціональних систем силової установки гібридного автомобіля. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів* / Харків. нац. техн. ун-т сіл. госп-ва ім. Петра Василенка. Харків, 2020. № 21. С. 195–200.
5. Бажинов О. В., Бажинова Т. О., Заверуха Р. Р. Метод визначення ефективної роботи силової установки гібридного автомобіля. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів* / Харків. нац. техн. ун-т сіл. госп-ва ім. Петра Василенка. Харків, 2021. № 23. С. 180–187.
6. Бажинов О. В., Бажинова Т. О., Заверуха Р. Р. Діагностика силової установки гібридного автомобіля : монографія / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків : ХНАДУ, 2021. 116 с.
7. Bazhinov O., Gerlici Ju., Kravchenko O., Haiek Ye., Bazhynova T., Zaverukha R., Kravchenko K. Development of a Method for Evaluating the Technical Condition of a Cars Hybrid Powertrain. *Symmetry*. 2021. Vol. 13, issue 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym13122356>.
8. Ляшук О. П., Пиндус Ю. І., Заверуха Р. Р., Пиндус Т. Б. Стенд дослідження робочих параметрів системи керування бензинових двигунів.

Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доп. IV Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, 25–26 листоп. 2015 р. / Терноп. нац. техн. ун-т. Тернопіль, 2015. Т. 1 : Сучасні технології в будівництві, транспорті, машино- та приладобудуванні. С. 258–259.

9. Бажинов О. В., Заверуха Р. Р. Використання систем нечіткого висновку для оцінки технічного стану гібридної силової установки автомобіля. *Автомобільний транспорт та інфраструктура* : зб. тез доп. III Міжнар. наук.-практ. конф., 23–25 квіт. 2020 р. Київ, 2020. С. 8–10.

10. Бажинов О. В., Заверуха Р. Р. Вибір стратегії управління силовою установкою гібридного автомобіля. *Концепція розвитку електричного транспорту та його систем* : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., (Харків, 7–9 квіт. 2020 р.) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків, 2020. С. 31–32.

11. Бажинов О. В., Заверуха Р. Р. Критерії оцінки технічного стану силової установки гібридного автомобіля. *Службово-бойова діяльність Національної гвардії України: сучасний стан, проблеми і перспективи* : матеріали наук.-практ. конф., 2 квіт. 2020 р. / Нац. акад. Нац. гвардії України. Харків, 2020. С. 4–5.

12. Заверуха Р. Р. Використання інформаційних систем в управлінні гібридними силовими установками автомобілів. *Комп'ютерні технології і мехатроніка* : зб. наук. пр. за матеріалами II Міжнар. наук.-практ. конф., 28 трав. 2020 р. / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків, 2020. С. 347–350.

13. Бажинов О. В., Заверуха Р. Р. Визначення технічного стану гібридної силової установки транспортних засобів. *Матеріали науково-практичної конференції* / Харків. нац. техн. ун-т сіл. госп-ва ім. Петра Василенка. Харків, 2020. С. 19–21.

14. Заверуха Р. Р. Обґрунтування режимів роботи гібридної силової установки автомобіля. *Молодь і технічний прогрес в АПВ* : матеріали Міжнар.

наук.-практ. конф., 7–8 трав. 2020 р. / Харків. нац. техн. ун-т сіл. госп-ва ім. Петра Василенка. Харків, 2020. Т. 2 : Інноваційні розробки в аграрній сфері. С. 64–65.

15. Бажинов О. В., Заверуха Р. Р. Математична модель тягової акумуляторної батареї гібридного автомобіля. *Автомобільний транспорт та інфраструктура* : зб. тез і доп. IV Міжнар. наук.-практ. конф., 21–23 квіт. 2021 р. / Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. Київ, 2021. С. 89–90.

16. Лабораторний стенд для визначення характеристик роботи електромагнітних форсунок бензинового двигуна легкового автомобіля : пат. 115354 U України МПК G 01F 5/00. № u201611488 ; заявл. 06.12.2016 ; опубл. 10.04.2017, Бюл. № 7. 4 с.

17. Лабораторний стенд для визначення робочих характеристик системи впорскування палива легкового автомобіля : пат. 128362 U України МПК G09B 25/02. № u201804380 ; заявл. 20.04.2018 ; опубл. 10.09.2018, Бюл. № 17. 4 с.

18. Лабораторний стенд для визначення робочих характеристик безконтактної системи запалювання легкового автомобіля : пат. 128366 U України МПК G 09B 25/02. № u201804397 ; заявл. 20.04.2018 ; опубл. 10.09.2018, Бюл. № 17. 4 с.

19. Лабораторний стенд для визначення робочих характеристик системи електропостачання легкового автомобіля : пат. 123583 U України МПК G 09B 25/02. № u201711117 ; заявл. 13.11.2017; опубл. 26.02.2018, Бюл. № 4. 4 с.

20. Бажинов О. В., Смирнов О. П., Серіков С. А., Двадненко В. Я. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика : монографія / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків : ХНАДУ, 2011. 236 с.

21. Бажинов О. В., Смирнов О. П., Серіков С. А., Гнатов А. В., Колесніков А. В. Гібридні автомобілі / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків : ХНАДУ, 2008. 327 с.

22. Смирнов О. П., Боженів В. С. Математичне моделювання тягово-швидкісних характеристик гібридного автомобіля. *Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил*. Харків, 2006. № 2 (8). С. 46–49.

23. Смирнов О. П. Теоретичні основи підвищення паливної економічності автомобіля за рахунок використання гібридної енергетичної установки. *Транспорт, екологія – сталий розвиток* : XII міжнар. наук.-техн. конф., 18–20 трав. 2006 р. Варна, 2006. С. 80–85.

24. . Смирнов О. П., Калмиков В. І. Обґрунтування використання вентильних електричних машин в гібридних силових установках автомобілів. *Автомобільний транспорт* : зб. наук. пр. / Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків, 2007. Вип. 21. С. 31–33.

25. Смирнов О. П. Синергетичний підхід до створення силової установки автомобіля. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету* : зб. наук. пр. Харків, 2007. Вип. 37. С. 131–133.

26. Смирнов О. П., Смирнова А. О. Схемні рішення та особливості будови автомобілів з гібридною силовою установкою. *Транспорт, екологія – сталий розвиток* : XIII міжнар. наук.-техн. конф., 10–12 трав. 2007 р. Варна, 2007. С. 613–619.

27. Бороденко Ю. М., Серіков С. А., Смирнов О.П. Система керування гібридною силовою установкою з пневмодвигуном. *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту* / Автомоб.-дор. ін-т Донец. нац. техн. ун-ту. Донецьк, 2008. № 1 (6). С. 32–38.

28. Смирнов О.П. Перспективи розвитку систем електроживлення транспортних засобів. *Транспорт, екологія – сталий розвиток* : XIV міжнар. наук.-техн. конф., 8–10 трав. 2008 р. Варна, 2008. С. 295–301.

29. Смирнов О. П., Панікарський О. С., Боженів В. С., Смирнова А. О. Використання конденсаторів великої ємності для забезпечення оптимальних параметрів роботи акумуляторних батарей гібридних автомобілів. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. Донецьк, 2009. № 3. С. 50–55.

30. Смирнов О. П., Кальянов Г. К., Кубата В. Г. Алгоритм роботи системи керування автоматизованими коробками передач автомобілів.

Автомобільний транспорт : зб. наук. пр. / Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків, 2009. Вип. 25. С. 33–36.

31. Смирнов О. П., Кальянов Г. К., Кубата В. Г. Алгоритм роботи системи керування автоматизованими коробками передач автомобілів *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології* : електрон. наук. спеціаліз. вид. № 1. URL: https://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/bitstream/123456789/5472/1/smirnov_kaljanov.pdf (дата звернення: 19.12.2022).
32. Смирнов О. П., Двадненко В. Я., Колесніков А. В. Схемні рішення створення гібридної силової установки на легковому автомобілі. *Наукові нотатки* : міжвуз. зб. наук. пр. Луцьк, 2010. Вип. 28. С. 498–502.
37. Danil V. Prokhorov “Toyota Prius HEV neurocontrol and diagnostics” *Neural Networks*, Vol. 21, Iss. 2-3, March-April 2008. – P. 458-465. *Для*. Сєвєродонецьк, 2010. № 6. С. 210–213.
38. P. Caratozzolo, M. Serra, J. Riera, Energy manage strategies for hybrid electric vehicles, *Proceedings of the IEEE Machines and Drives Conference (IEMDC 03)*, 2003. – P. 241-248.
39. Смирнов О. П. Концептуальні рішення створення екологічно чистих автотранспортних засобів з електроприводом. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету* : зб. наук. пр. Харків, 2011. Вип. 55. С. 52–57.
40. Baumann, B., Washington, G., Glenn, B., & Rizzoni, G. (2000). Mechatronic desing and control of hybrid electric vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 5(1). – P.58-72.
41. M. Salman, N. J. Schouten, and N. A. Kheir, “Control strategies for parallel hybrid vehicles” , in *Prjc. Of the American Control Conf.*, Chicago, IL, June 2000. – P. 524-528.
42. Schouten, N.J., Salman, M. A., Kheir, N.A., “Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles”, *IEEE Transaction on Contrjl Systems Technology*, vol. 10, No. 3, May 2002. P. 460-468.

43. Б. Фріске, М. Клетцьку, Ф. Маузер. Тенденції у концепції транспортних засобів та розробка ключових технологій для гібридних та акумуляторних електромобілів. Всесвітній симпозіум та виставка електромобілів (EVS27), Барселона (Іспанія), 17–20 листопада 2013 р.
44. Syed, F., Filev, D., & Ying, H. (2007). A rule-based fuzzy driver advisory system for fuel economy improvement in a hybrid electric vehicle. In *Proceedings of North American fuzzy information processing society conference*. – P. 178-183.
45. Schouten, N.J., Salman, M.A., and Kheir, N.A., “ Energy management strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic” *Control Engineering Practict*, vol. 11. -2003. P. 171-177.
46. А. Остаді, М. Казерані. Оптимальний розмір акумуляторної батареї в електромобілі, що підключається. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, том 63, випуск 7, стор. 3077–3084, 2014
- 47 К. Раджашекара. Паралель між технологіями перетворення енергії в електромобілі та гібридні автомобілі. *Журнал IEEE Electrification*, том 2, випуск 2, стор. 50–60, 2014 р.
48. Аргун Іц. В. Визначення найбільш ефективних тягових джерел струму для електромобілів. *Автомобільний транспорт* : зб. науч. пр. / Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків, 2017. Вип. 41. С. 11–22.
49. Serikov Sergey A. Synthesis of Optimal Control of Hybrid Engine Unit. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2009. Vol. 41, issue 3. P. 71–81. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v41.i3.80.
50. Serikov S. A. Neural network model of internal combustion engine. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2010. Vol. 46, issue 6. P. 998–1007. DOI: 10.1007/s10559-010-9281-3.
51. Hybrid vehicle : пат. 5865263 США МПК6 В60К 6/00. № 08609762 заявл. 23.02.1996 ; опубл. 02.02.1999. URL: https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=US39064774&_cid=P20-LBUSO8-69461-1 (дата звернення: 19.12.2022).

52. DieselNet : website. URL: www.dieselnet.com (last accessed: 19.12.2022).
53. Тімков О. М. Аналіз конструктивних схем гібридних. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Сєвєродонецьк, 2010 № 7. С. 1–4.
54. Hong Shu, Lijun Deng, Peixiang He and Yuanbo Liang. “Speed Prediction of Parallel Hybrid Electric Vehicles on Fuzzy Theory” International Conference on Power and Energy Systems (ICPES). – 2012. – Lecture Notes in Information Technology, vol. 13. – P. 493-498.
55. Dorri, M. and Shamekhi, A. “Design of an Optimal Control Strategy in a Parallel Hybrid Vehicle in Order to Simultaneously Reduce Fuel Consumption and Emissions” SAE Technical Paper 2011-01-0894, 2011, doi:10.4271/2011-01-0894.
56. Montazeri-Ch,M., Poursageneticmad, A., and Ghalichi, B., “Application of genetic algorithm for optimization of control strategy in parallel hybrid electric vehicles,” Journal of the Franklin Institute, (343): 420-435. – 2006.
57. Паникарський А. С. Економічні посилки розвитку гібридного автотранспорту в Україні *Автомобільний транспорт* : зб. науч. пр. / Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків, 2006. Вип. 18. С. 14–16.
58. Бажинов О. В., Боженів В. С., Паникарський А. С. Вибір оптимальних параметрів компонентів електросилової установки гібридного автомобіля. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету* : зб. науч. пр. Харків, 2006. № 34/35. С. 224–227.
59. Методичні вказівки до курсової роботи з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем» / уклад.: Смирнов О. П. та ін. ; Харків. автомоб.-дор. ун-т. Харків : ХНАДУ, 2007. 28 с.
60. Arezoo D. Abdollahi, S.K. Nikraves, M. B. Menhaj. “An Intelligent Control Stratehy in a Parallel Hybrid Vehicle”. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol. 4- No. 2- Fall and Winter 2007. – P. 43-52.

61. B. M. Brahma, "Intelligent control strategies for hybrid vehicles using neural network and fuzzy logic" *Elect. Eng; ohio univ., columbus*, 1997. – 98 p.
62. Jong-Seob Won. *Intelligent Energy Management Agent for a Parallel Hybrid Vehicle: dissertation for the degree of doctor of philosophy*. Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University. – May, 2003. – 93p.
63. T. Markel, A. Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, B. Kramer, M. O'Keefe, S. Sprik, K. Wipke. ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling/*Journal of Power Sources* 110 (2002). – P. 255-266.
64. S. E. Lyshevski and C. Yokomoto, "Control of hybrid-electric vehicles", in *Proc. of the American Control Conf.*, Philadelphia, PA, June 1998. – P. 2148-2149.
65. James Larminie, John Lowry. *Electric vehicle technology explained*. – John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO 19 8&Q, England. – 2003. – 296p.
66. Dhameja, Sandeep. *Electric vehicle battery systems / Sandeep Dhameja*. Sandeep Dhameja. Newnes, 2002. – 230p.
67. Portier C. J., Wolfe M.S. eds. *Assessment of Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields*. – NIEHS Working Group Report NIH Publication. – 1998. - № 98-3981. – 508 p.
68. Prokhorov Danil V. Toyota Prius HEV neurocontrol and diagnostics. *Neural Networks*. 2008. Vol. 21, issue 2/3. P. 458–465.
69. Caratozzolo P., Serra M., Riera J. Energy manage strategies for hybrid electric vehicles. *Proceedings of the IEEE Electric Machines and Drives Conference (IEMDC'03)*. 2003. P. 241–248.
70. Lin C. C., Huei Peng, Grizzle J. W. Power management strategy for a parallel hybrid electric truck. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2003. Vol. 11, № 6. P. 839–849.
71. Fei-Yue Wang, Huaguang Zhang, Derong Liu. Adaptive Dynamic Programming: An Introduction // *IEEE Computational Intelligence Magazine*, May, 2009. – P. 39-47.

72. Shalabh Bhatnagar, Richard S. Sutton, Mohammad Ghavamzadeh, Mark Lee. Natural actor-critic algorithms // *Automatica (Journal of IFAC)*, Volume 45 Issue 11, November, 2009. – P. 2471-2482.

73. Worldwide emission standards and related regulations. Passenger cars. Light & medium duty vehicles. – Continental automotive GmbH division powertrain communication. – March, 2012. – 102p.

74. Zhang Yi, Liu Heping, Wang Huabin. “Torque Control Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles using Fuzzy Logic”. *WSEAS Transactions on Systems*, iss. 4, vol. 10. – 2011. – P. 116-125.

75. H Zhong, F Wang, G-Q Ao, J-X Qiang, L Yang, X-J Mao, An optimal torque distribution strategy for an integrated starter-generator parallel hybrid electric vehicle based on fuzzy logic control, *Proc. IMechE J. Automobile Engineering*, vol.222, partD, Sep. 2007. – P. 79-92.

76. Hong Shu, Lijun Deng, Peixiang He and Yuanbo Liang. “Speed Prediction of Parallel Hybrid Electric Vehicles Based on Fuzzy Theory” *International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)*. – 2012. – *Lecture Notes in Information Technology*, vol. 13. – P. 493-498.

77. Bernd M. Baumann, Gregory Washington, Bradley C. Glenn, and Giorgio Rizzoni, Member. *Mechatronic Design and Control of Hybrid Electric Vehicles*. *IEEE/ASME Transaction on mechatronics*, vol. 5, No. 1, 2000.- P. 58-72.

78. S. Delprat, T. M. Guerra. and J. Rimaux, “Control strategies for hybrid vehicles: Optimal control”, in *Proc., Vehicular Technology Conf. (VTC 2002-Fall)*, vol. 3, Vancouver, Canada, September 2002. – P. 1681-1685.

79. Nelles Oliver. *Nonlinear System Identification : From Classical Approaches to Neural Networks, Fuzzy Models, and Gaussian Processes*. Berlin : Springer, 2020. 1225 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-47439-3>.

80. Sebastien Delprat, Jimmy Lauber, Thierry Marie Guerra, and J. Rimaux. *Control of a Parallel Hybrid Powertrain: Optimal Control*. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, vol. 53, No. 3, MAY 2004. – P. 872-8881.

81. James Larminie, John Lowry. Electric vehicle technology explained. – John Wiley& Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. – 2003. – 296 p.
82. Hecht-Nielsen R. Theory of the Back Propagation Neural Network. *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, IEEE*. New York, 1989. Vol. 1. P. 593–606.
83. Cybenko G. Approximation by Superposition of a Sigmoidal Function. *Mathematics of Control, Signals, and Systems*. 1989. № 2. P. 303–314. URL: https://web.njit.edu/~usman/courses/cs675_fall18/10.1.1.441.7873.pdf (last accessed: 19.12.2022).
84. Hornik K., Stinchcombe M., White H. Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators. *Neural Networks*. 1989. № 2. P. 359–366.
85. Hornik K. Approximation Capabilities of Multilayer Feedforward Networks. *Neural Networks*. 1991. № 4. P. 251–257.
86. Генетичні алгоритми, штучні нейронні мережі і проблеми віртуальної дійсності / Вороновский Г. К. та ін. Харків, 1997. 112 с.
87. Moller M. F. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning. *Neural Networks*. 1993. Vol. 6. P. 525–533.
88. Hagan M. T., Menhaj M. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*. 1994. Vol. 5. P. 989–993.
89. Wallmark Oskar. On Control of Permanent-Magnet Synchronous Motors in Hybrid-Electric Vehicle Applications / Department of electric power engineering ; Chalmers university of technology. Goteborg, 2004. 115 p. (Technical reports at the school of electrical engineering).
90. Li Liu, Wenxin Liu, David A. Cartes. Permanent magnet synchronous motor parameter identification using particle swarm optimization. *International journal of computational Intelligence research*. 2008. Vol. 4, № 2. P. 211–218.
91. Arash Hassanpour Isfahani, Siavash Sadeghi. Design of a permanent magnet synchronous machine for the hybrid electric vehicle. *Proceedings of world*

academy of science, engineering and technology (PWASET). 2008. Vol. 35. P. 567–571.

92. Дука А. КДж. Кобб. Nissan тестує Leaf Mule з запасом ходу більше ніж 250 миль з новим хімічним складом батареї. 14 червня 2015 р. Доступно за адресою: <http://www.hybridcars.com/nissan-testing-250-mile-range-leaf-with-new-battery-chemistry/>

93. Mehul Oswal, Jason Paul, Runhua Zhao / A comparative study of Lithium-Ion Batteries // University of Southern California. AME 578 Project. – 2010. – 31 p.

94. Haverkort. Battery Modeling. Technical Report TR-CTIT-08-01, Centre for Telematics and Inf. Tech., U. Twente, 2008. – 25 p.

95. GOST 20306-90 “Motor vehicles. Fuel efficiency. Test methods.”

96. Smirnov, O.P., (2013), “*Gibridnaya silovaya ustanovka dlya transportnyh sredstv*” [Hybrid power plant for vehicles]. Smirnov, O.P., Bogaevskiy, A.B., Smirnova, A.O. // Vestnik KhNTUSH after Petr Vasilenko, 2013, № 139, pp. 207-211.

97. Bazhynov O.V., Veselaya M.A. (2016), Intellectual Drive With Electric Engines On a Stock Car, Mechanics, Materials Science & Engineering Journal, Magnolithe GmbH, Vol.3, DOI 10.13140/RG.2.1.3296.9369

98. C.L. Wang, C. L. Yin, T. Zhang, L. Zhu, Powertrain design and experiment research of a parallel hybrid electric vehicle, International Journal of Automotive Technology, (2009) 10: 589. doi:10.1007/s12239-009-0069-2

99. Andreas Lange, Ferit Küçükay, A new, systematic approach to determine the global energy optimum of a hybrid vehicle. Automotive and Engine Technology, (2016). doi:10.1007/s41104-016-0011-3

ДОДАТКИ

Додаток А

Результати експериментальних досліджень гібридної силової установки

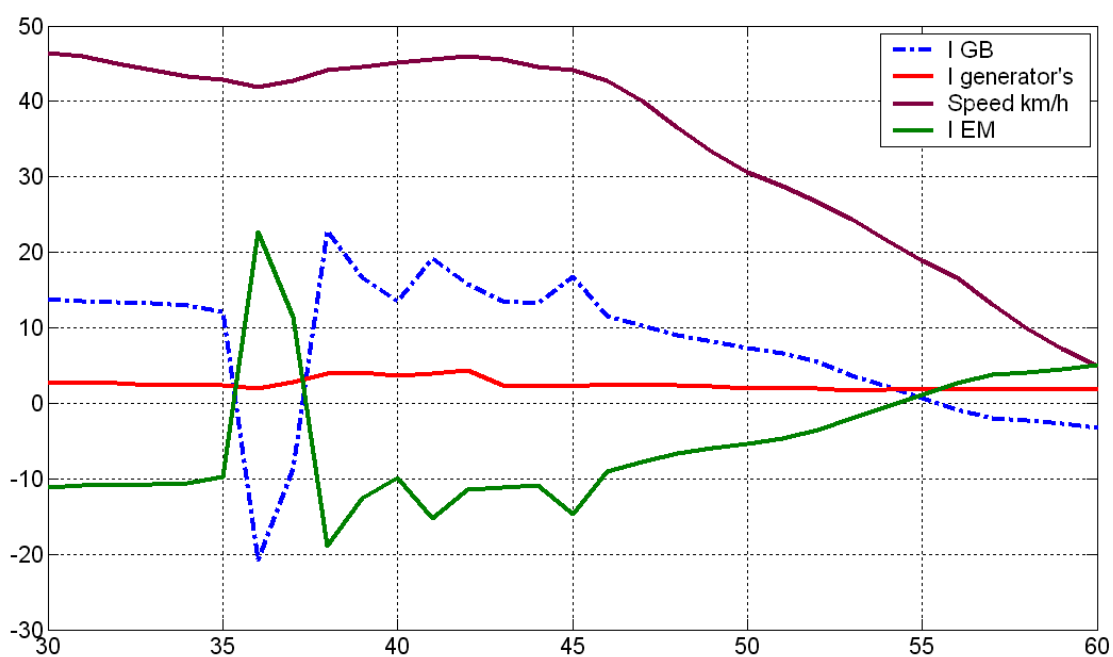
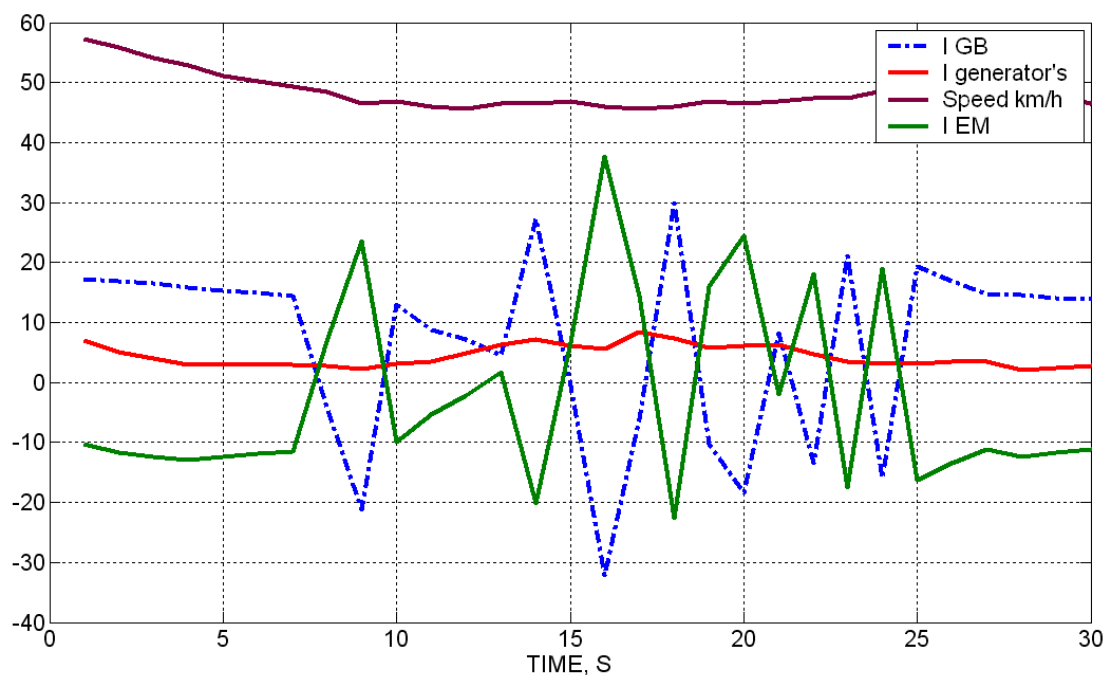
Условні позначки:

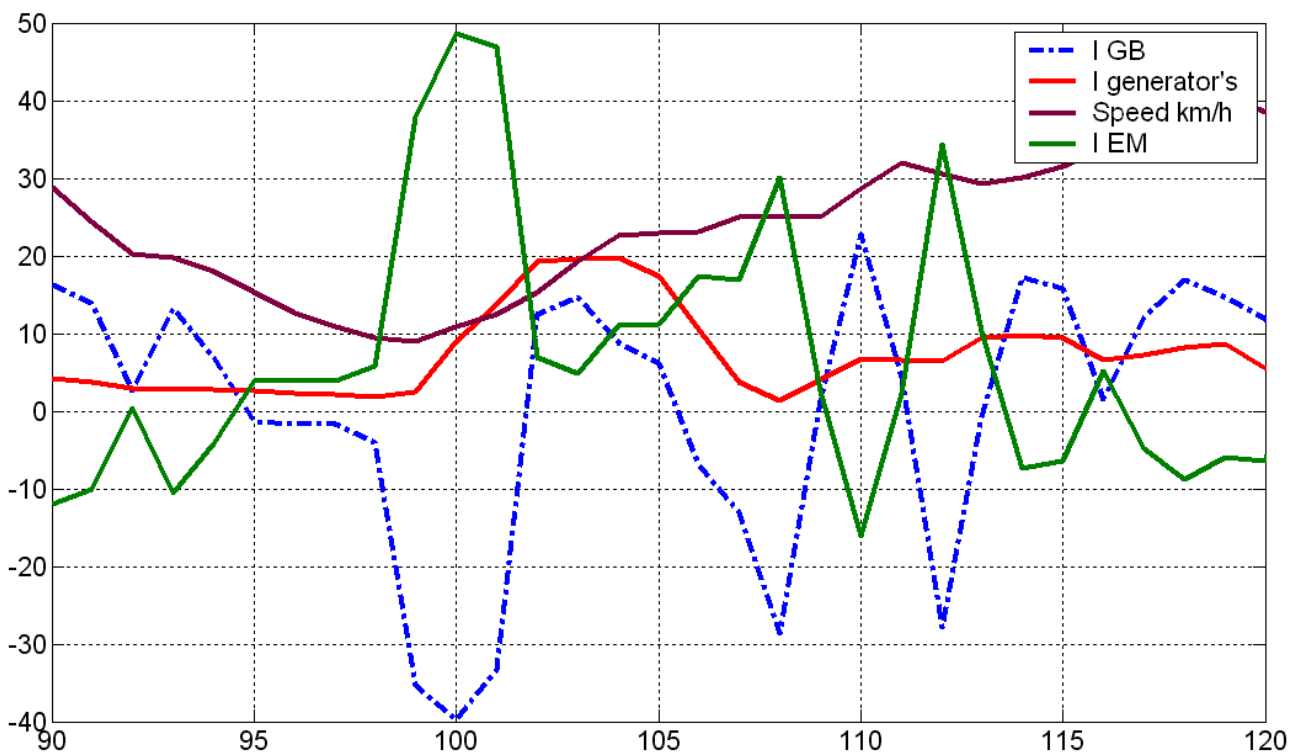
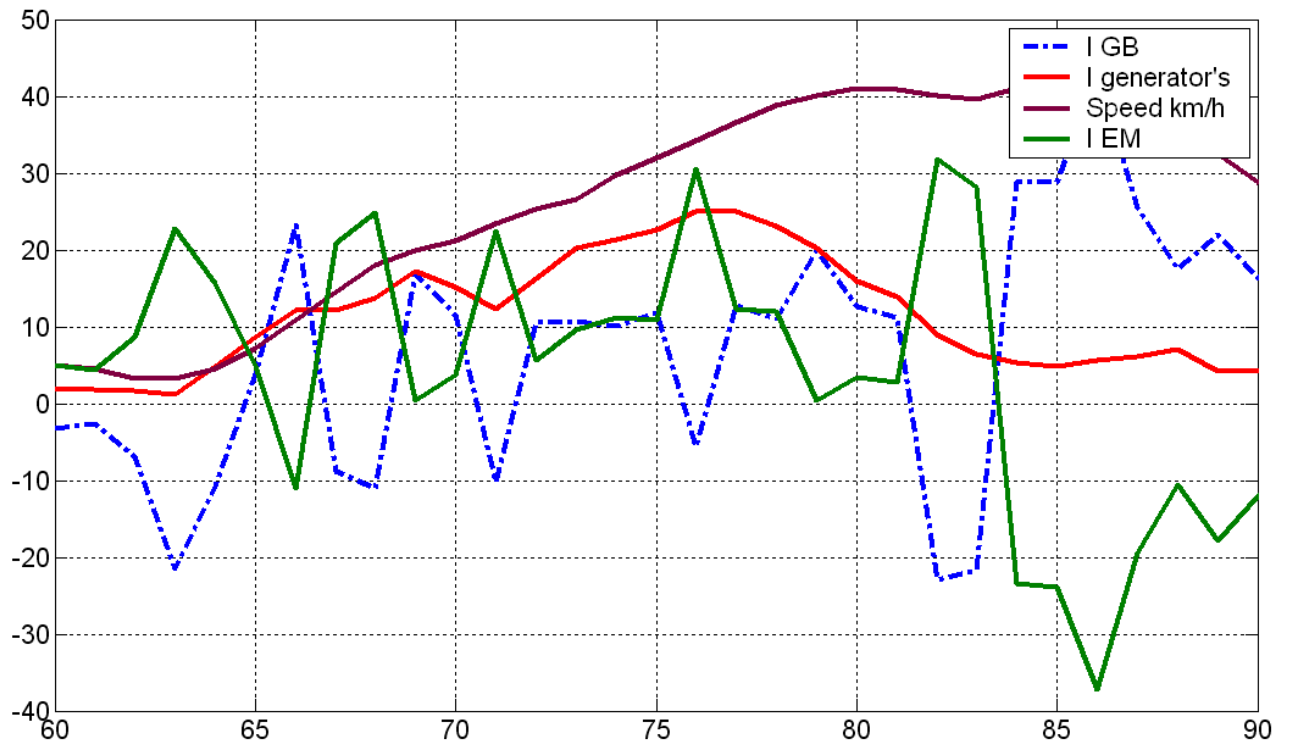
I_{GB} – струм тягової АКБ, А

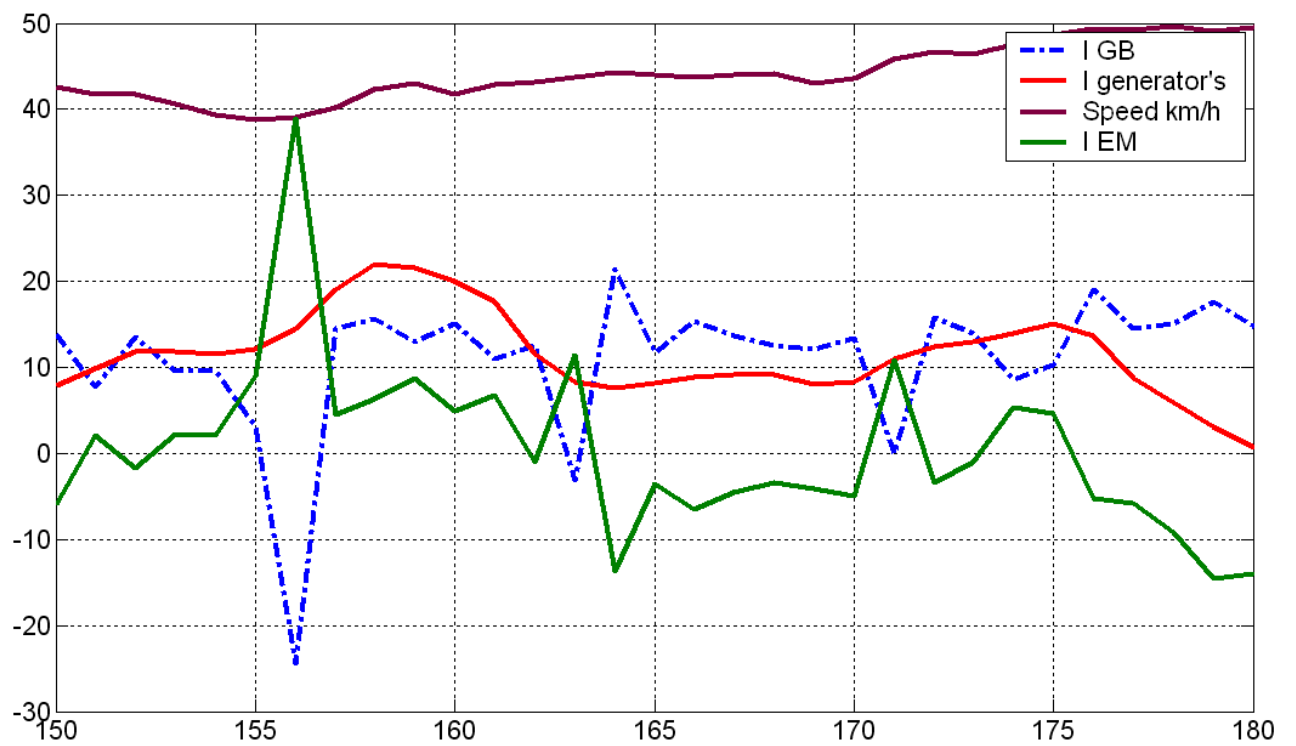
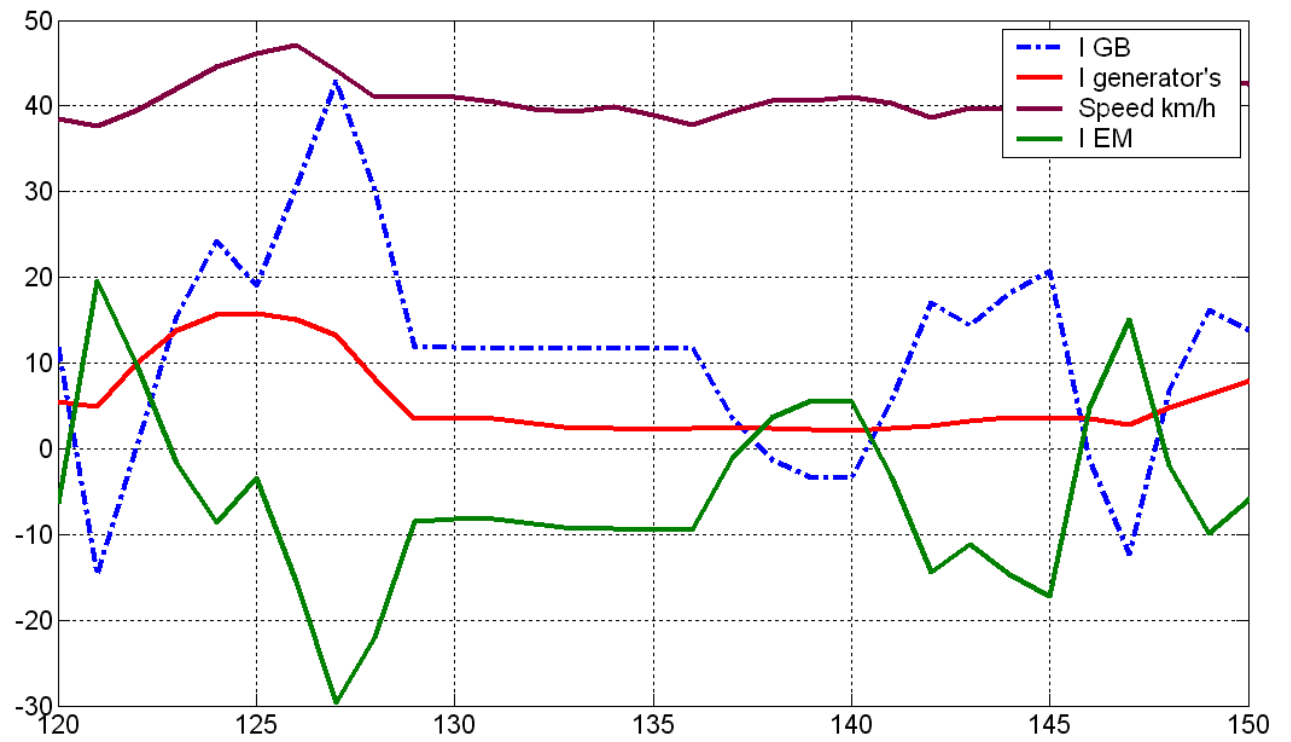
$I_{generator's}$ – струм генератора, А

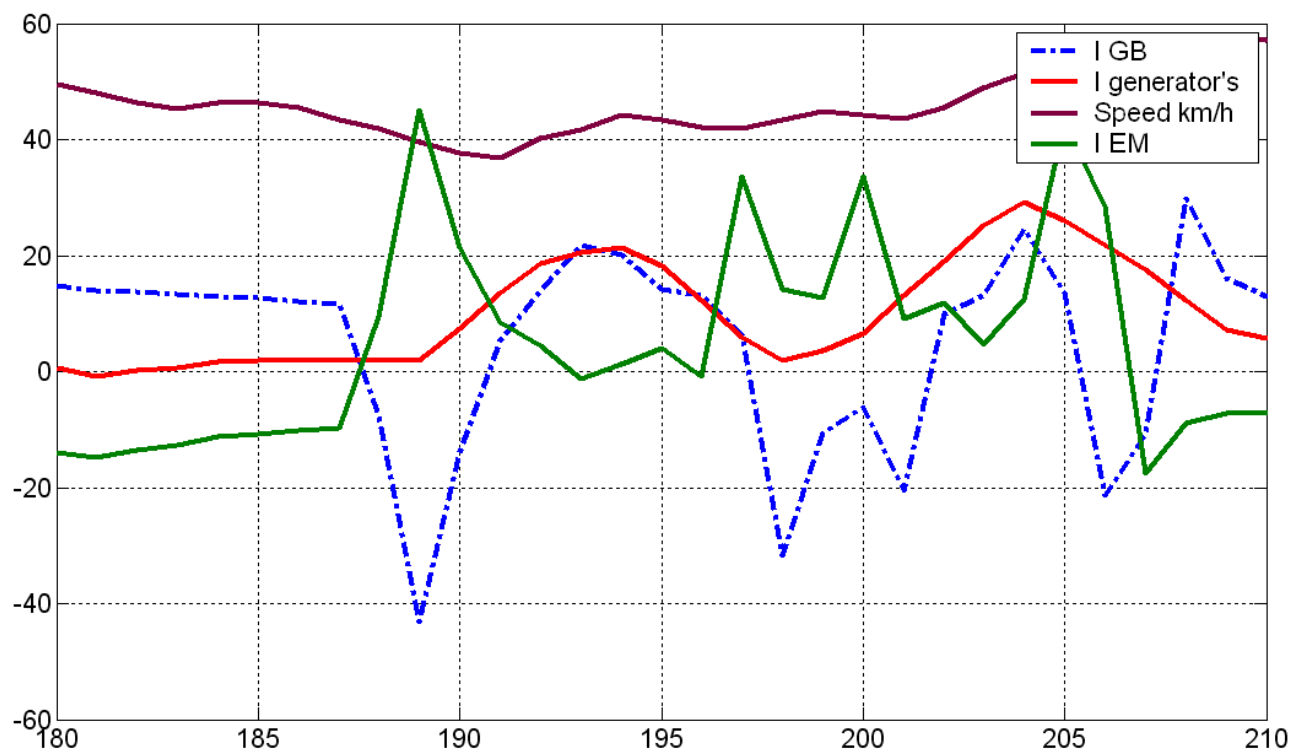
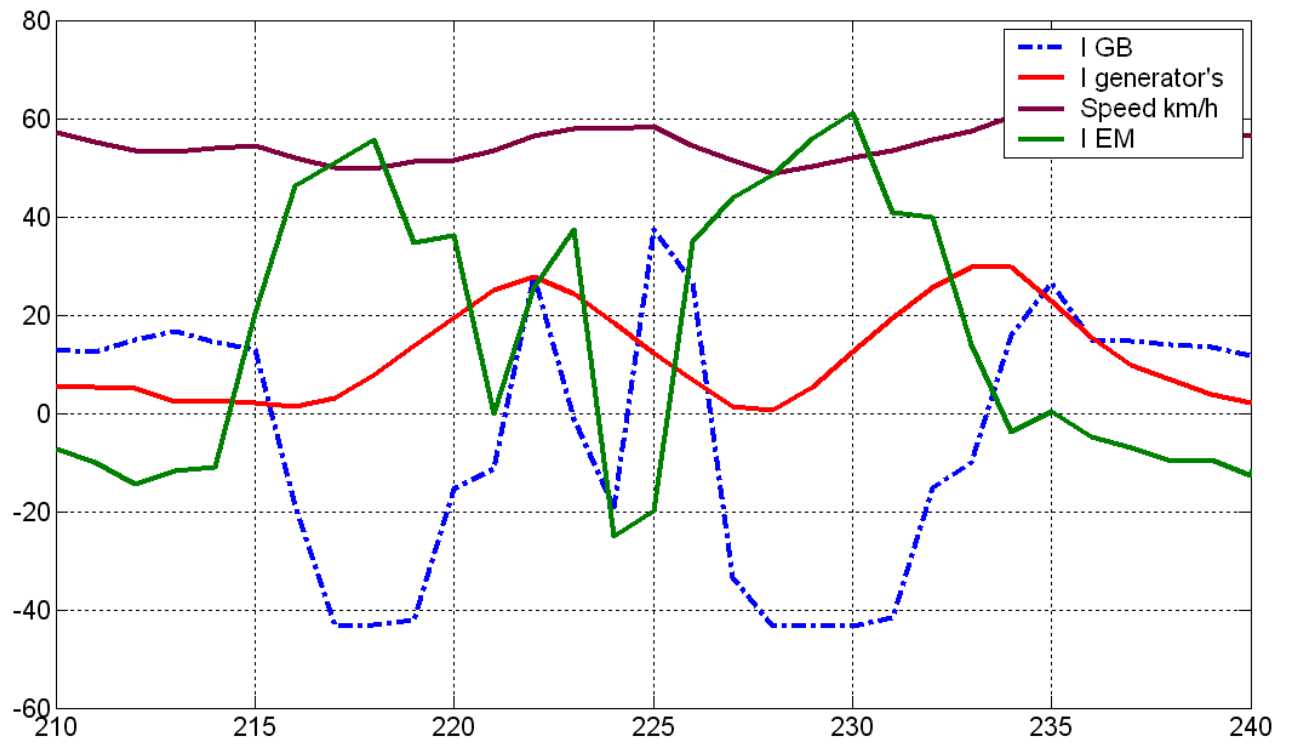
Speed km/h – швидкість руху, км/год

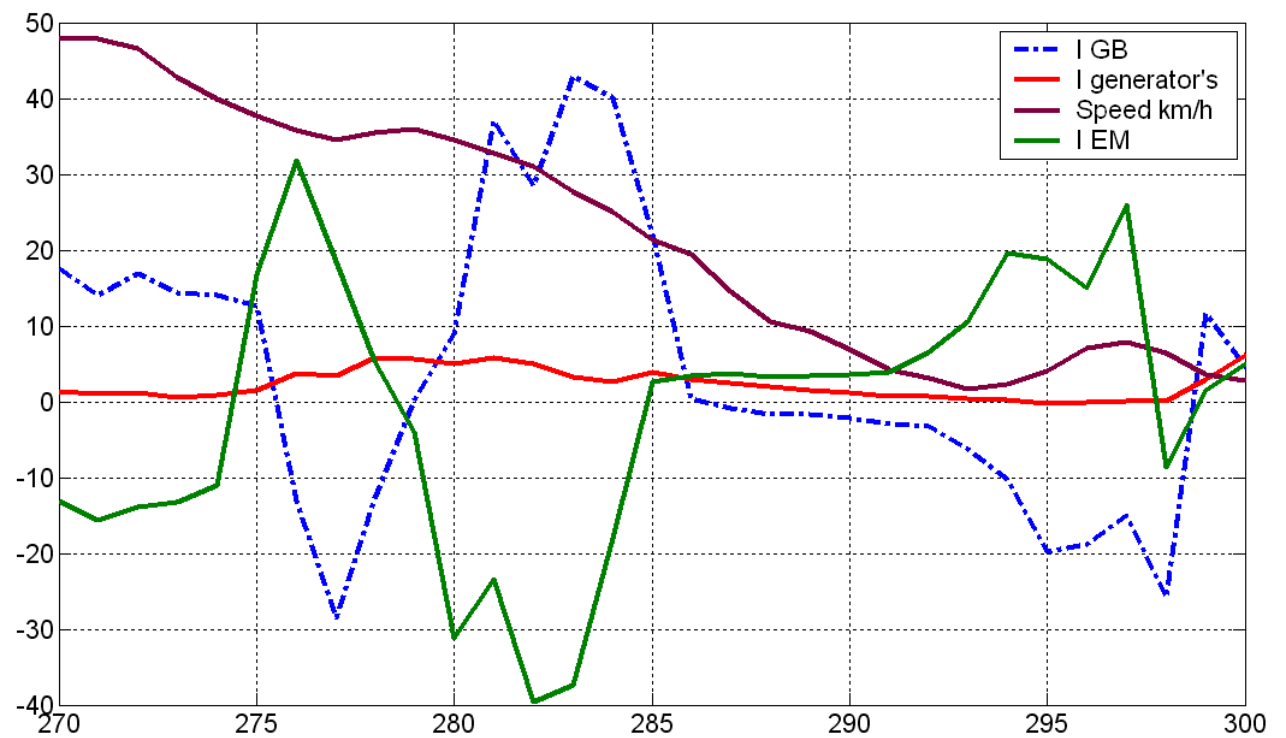
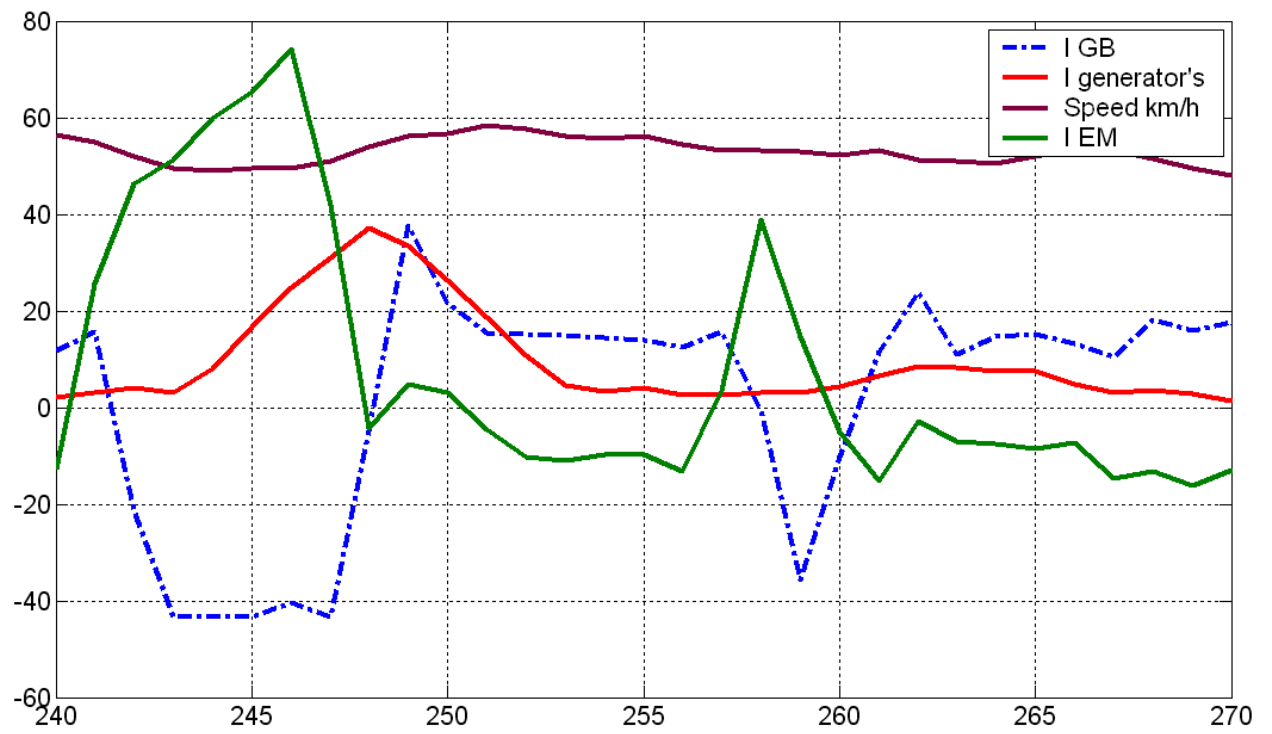
I_{EM} – струм електродвигуна, А

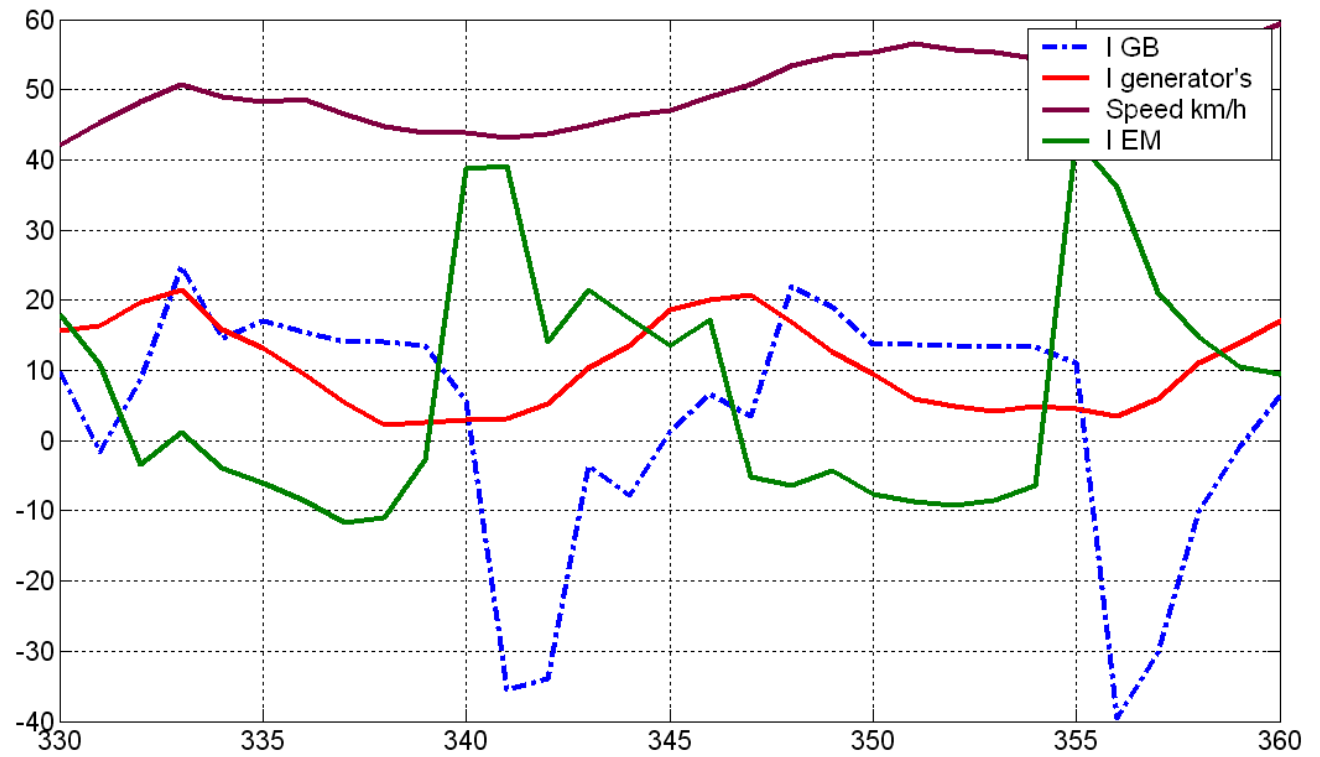
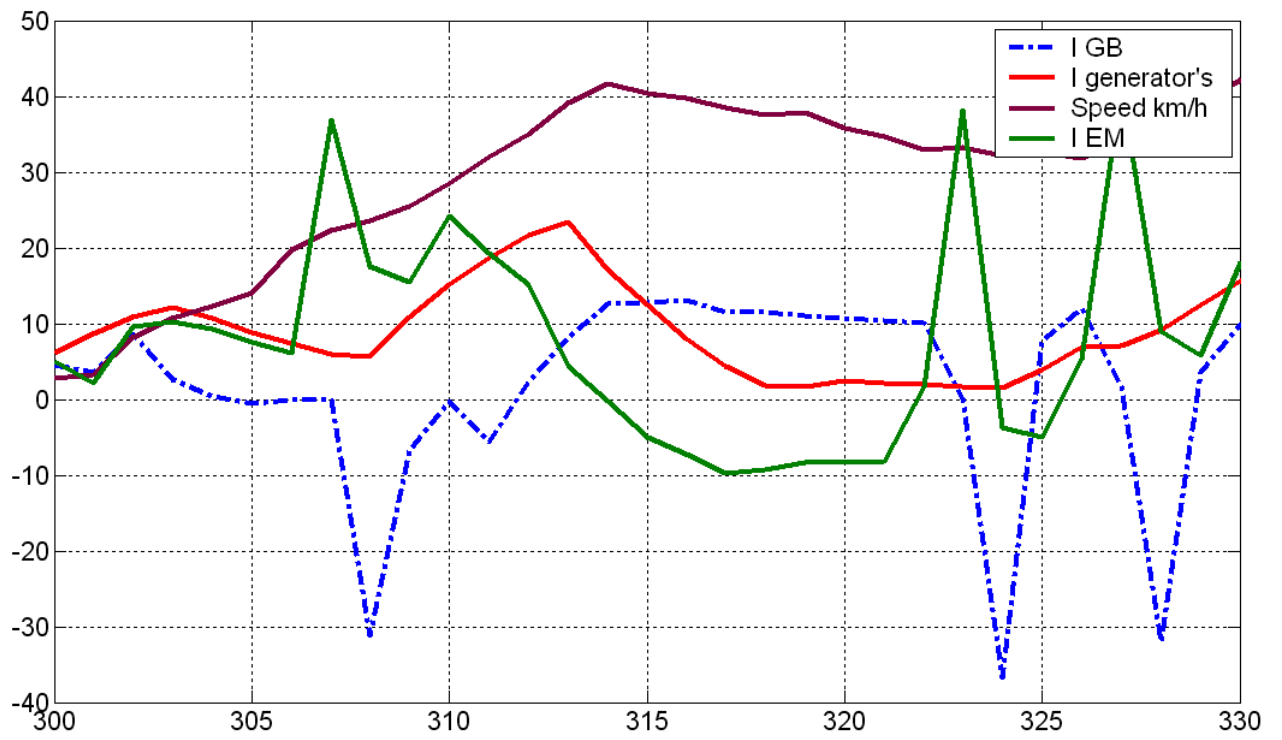


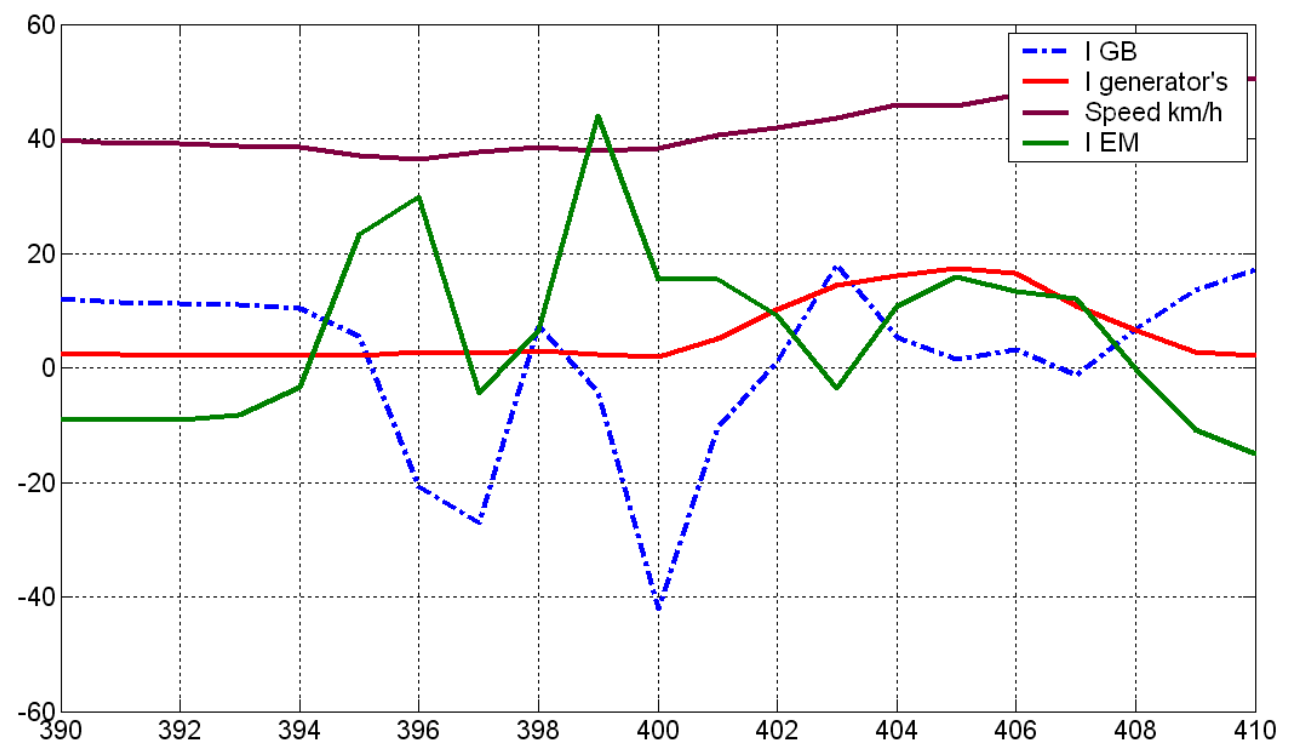
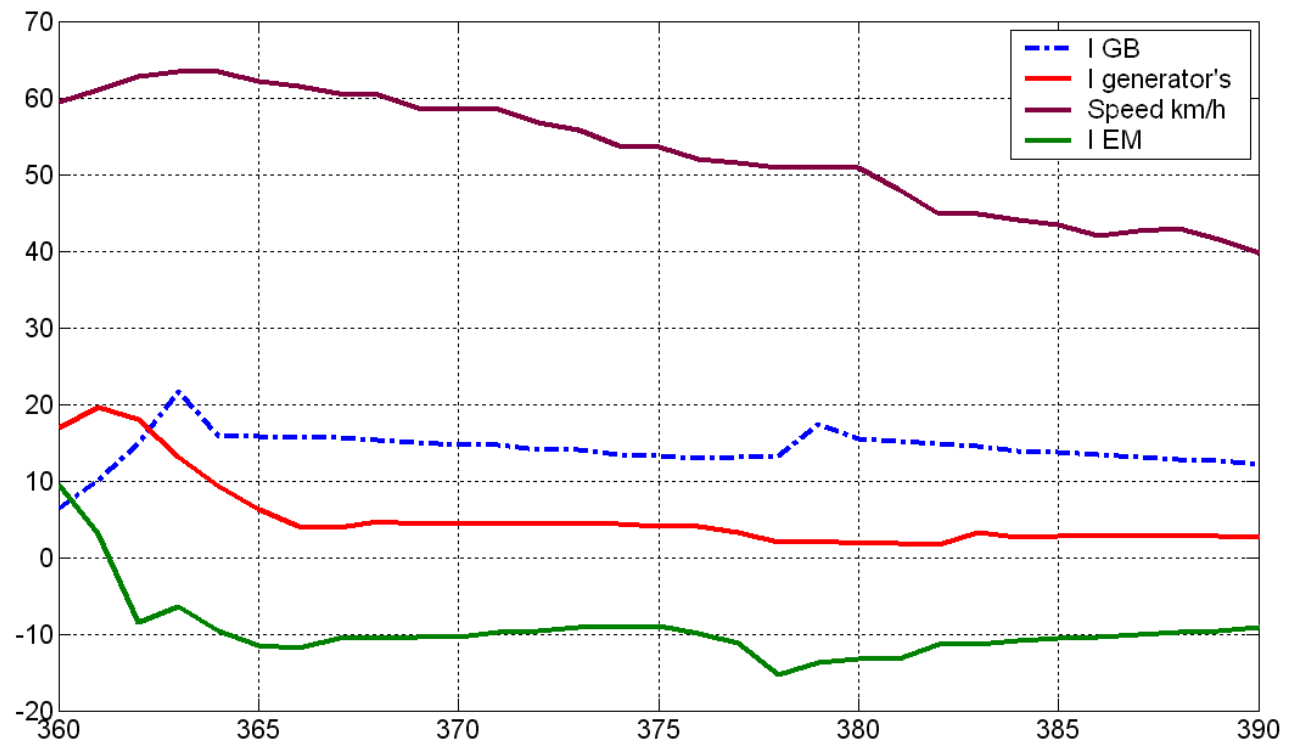


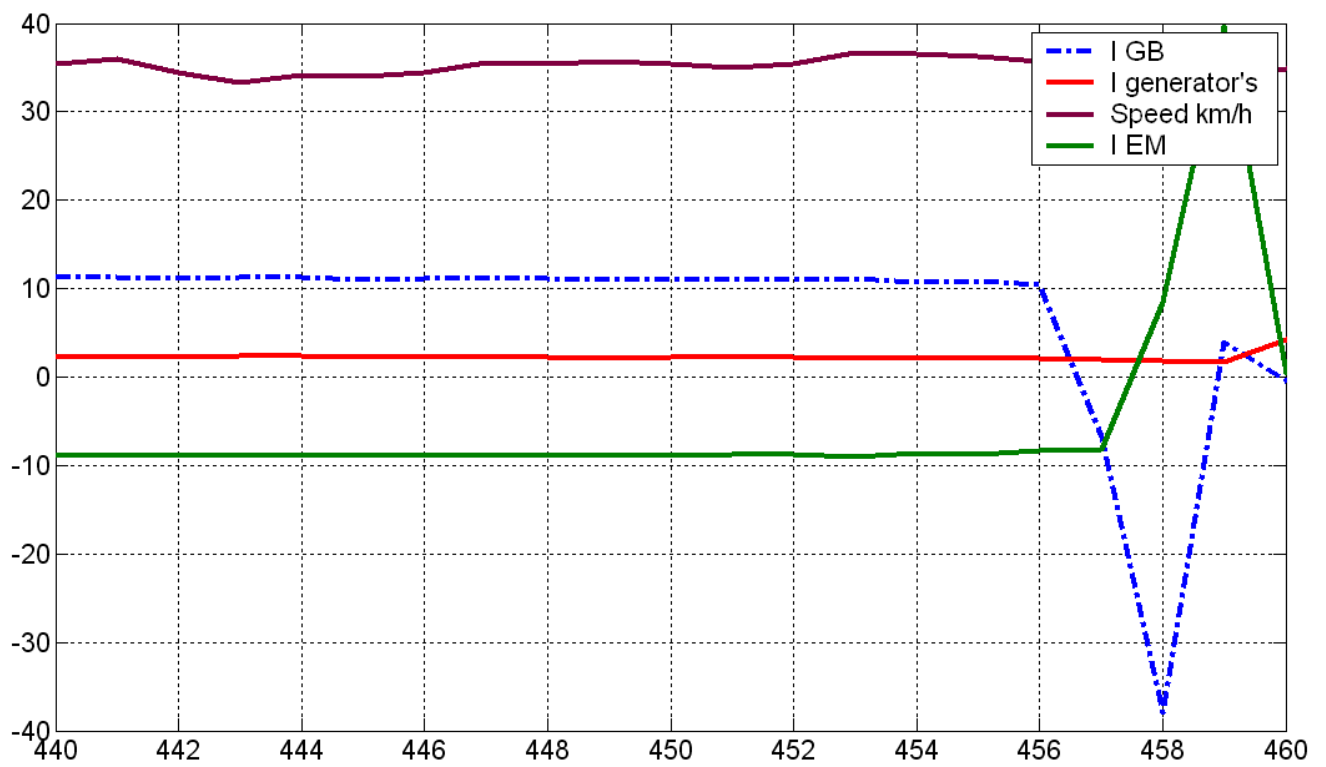
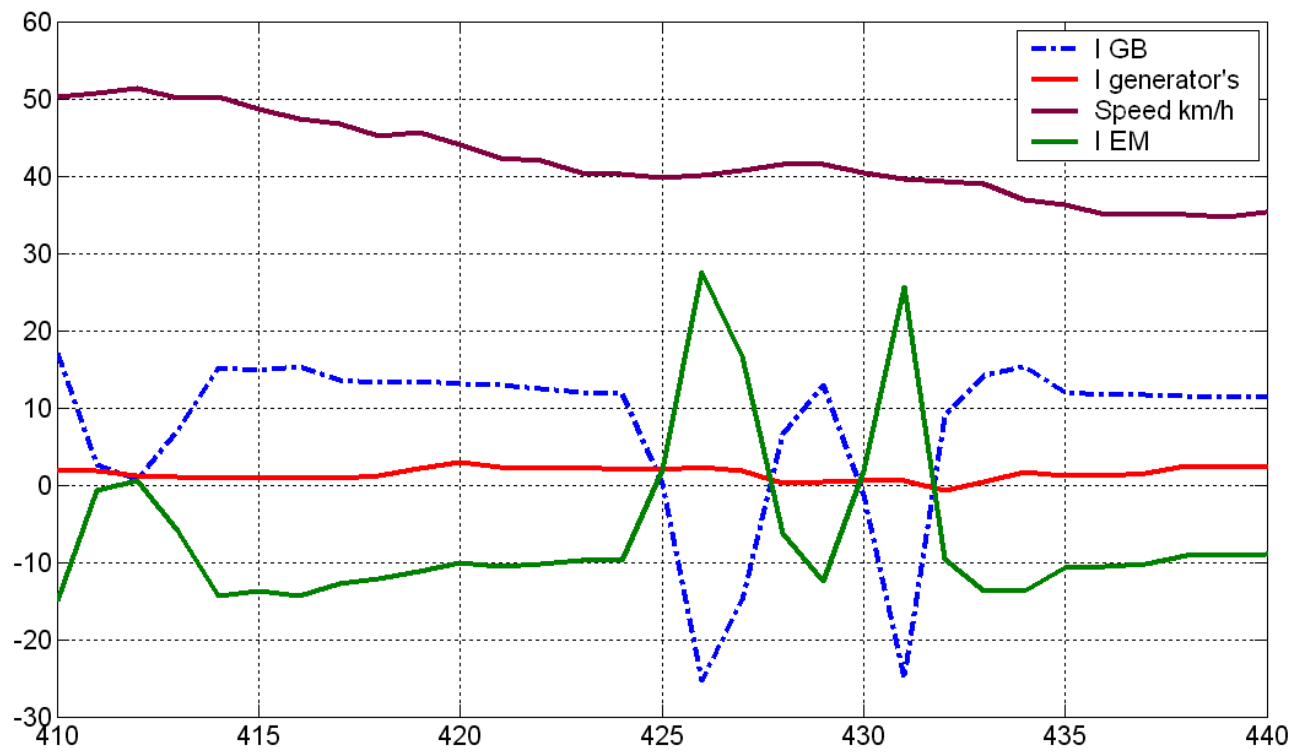


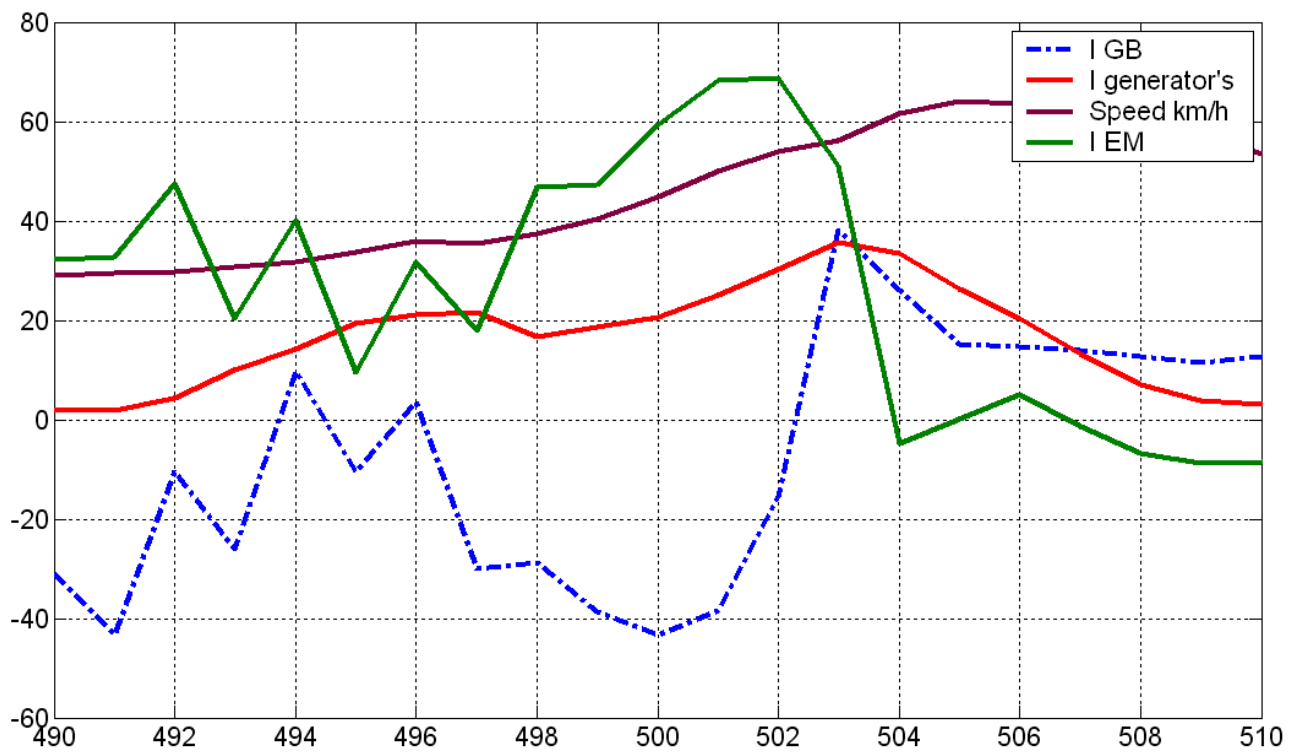
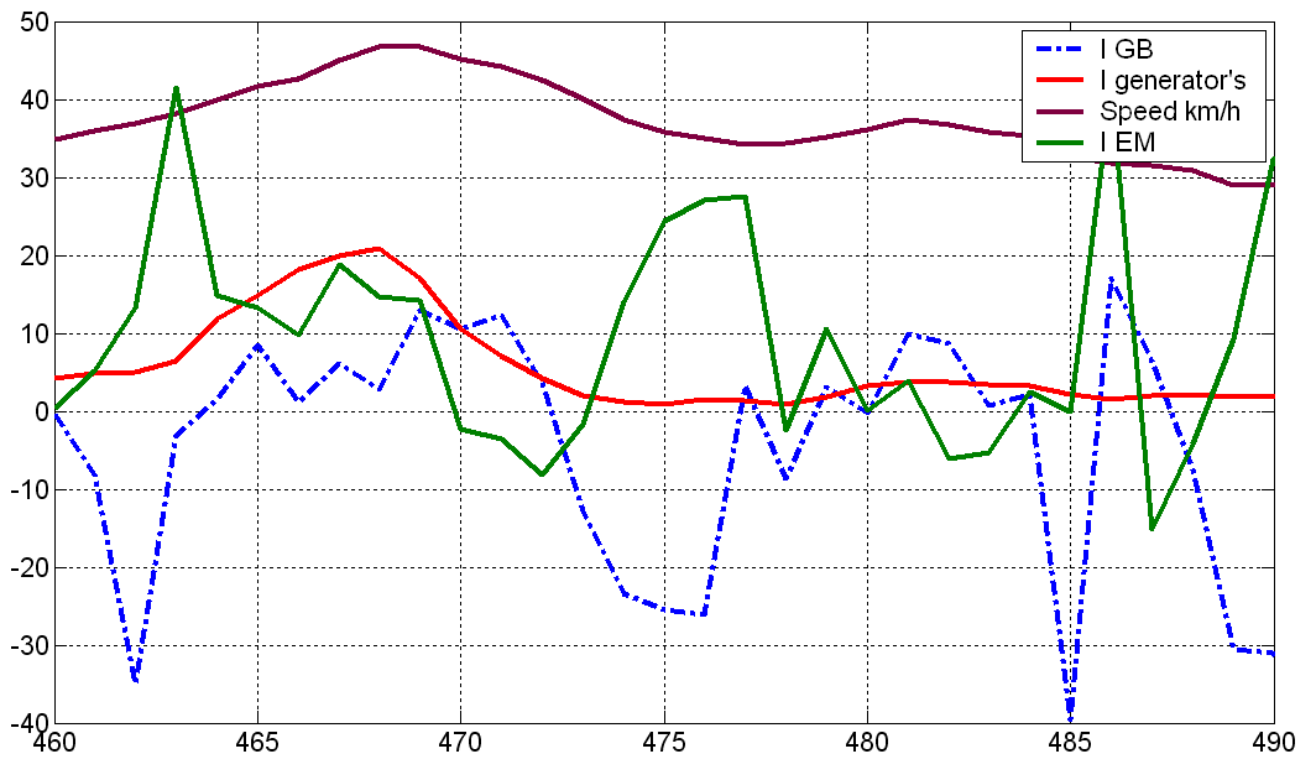


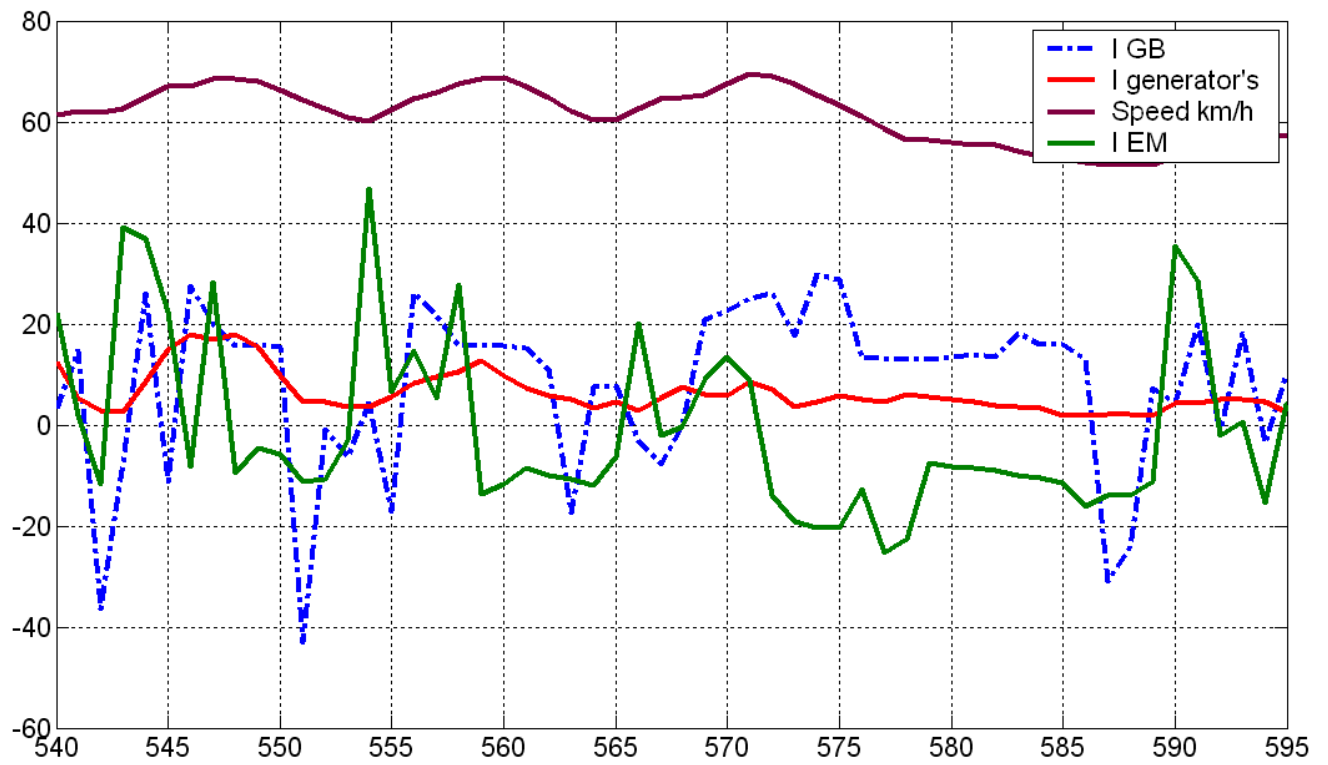
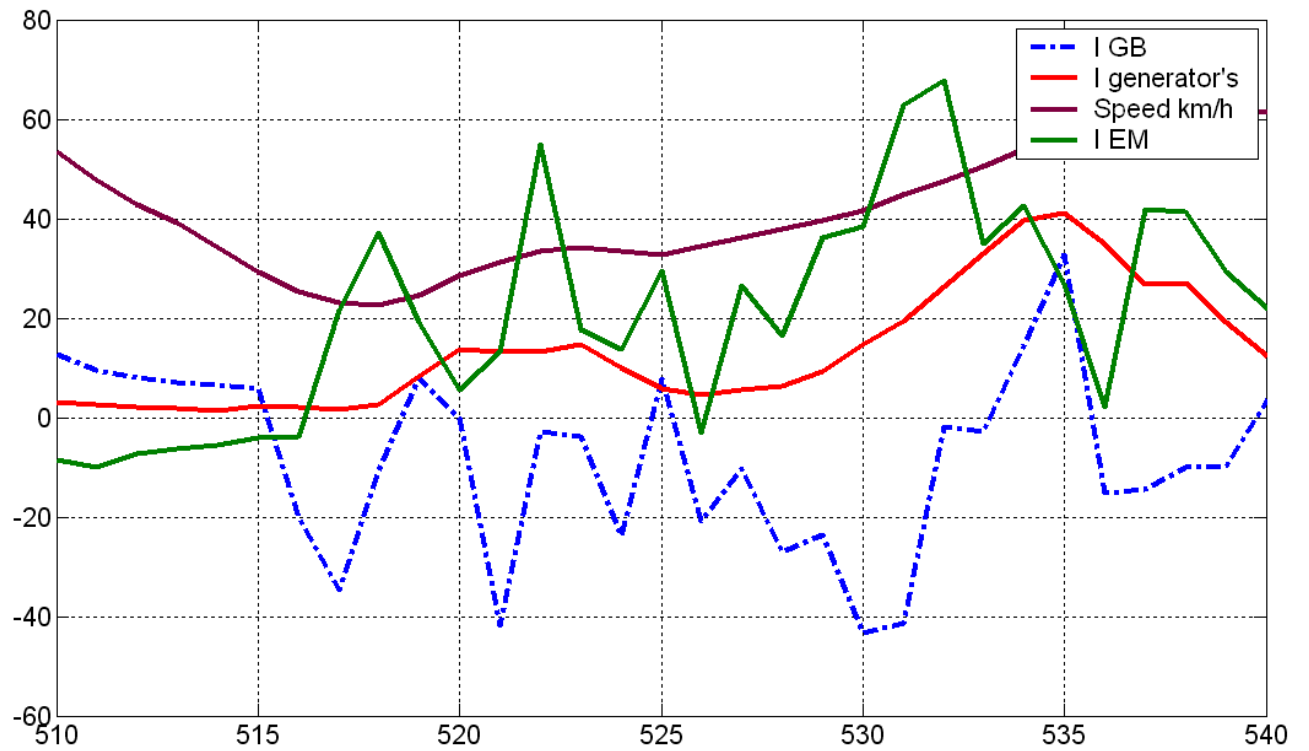












Додаток Б

Дослідження потоків енергії в ГСУ на різних режимах руху

P_{GB} – потужність АКБ, кВт

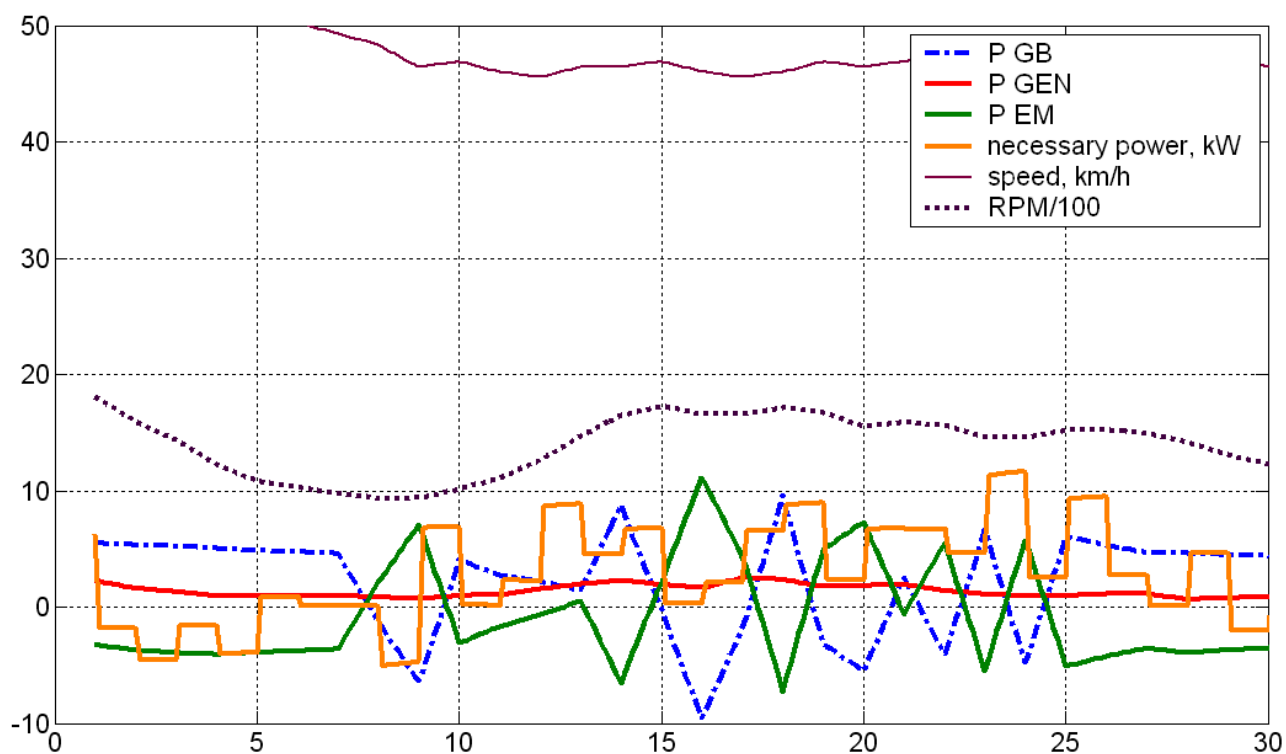
P_{GEN} – потужність генератора, кВт

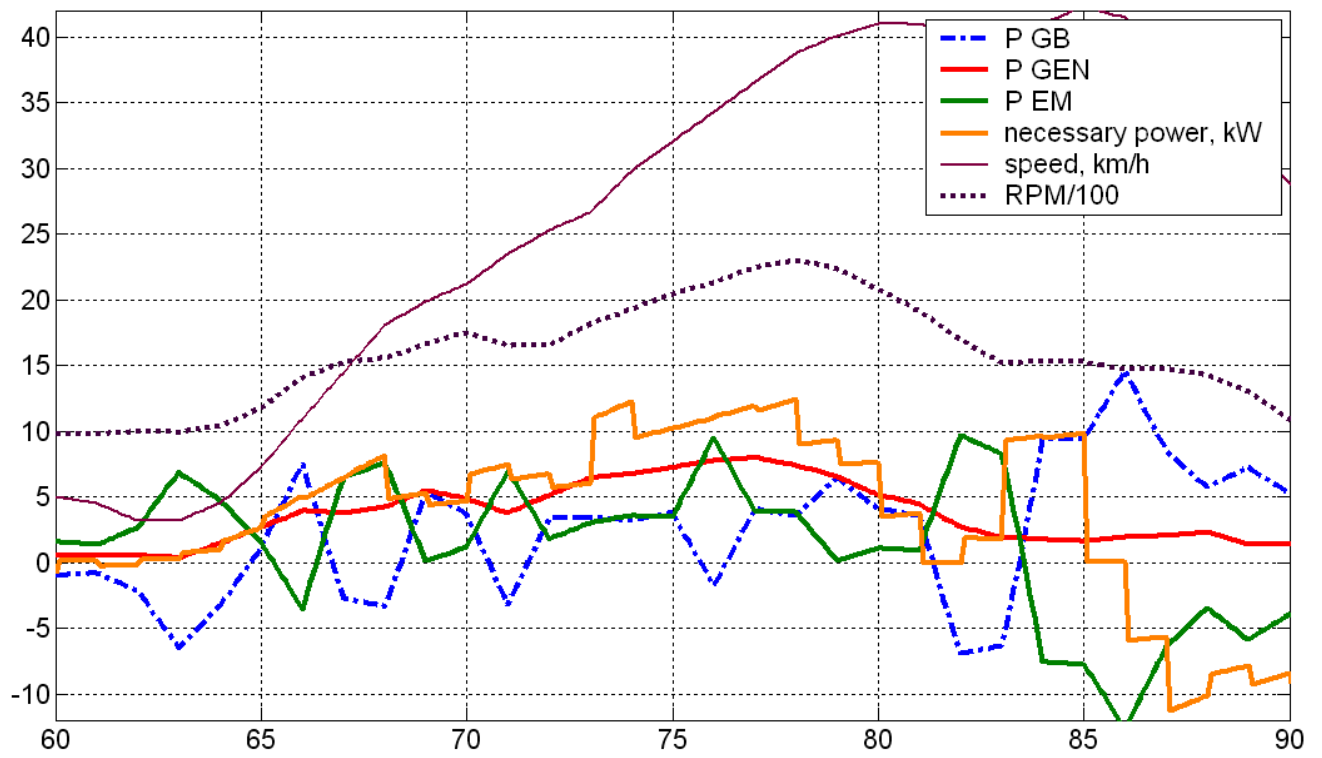
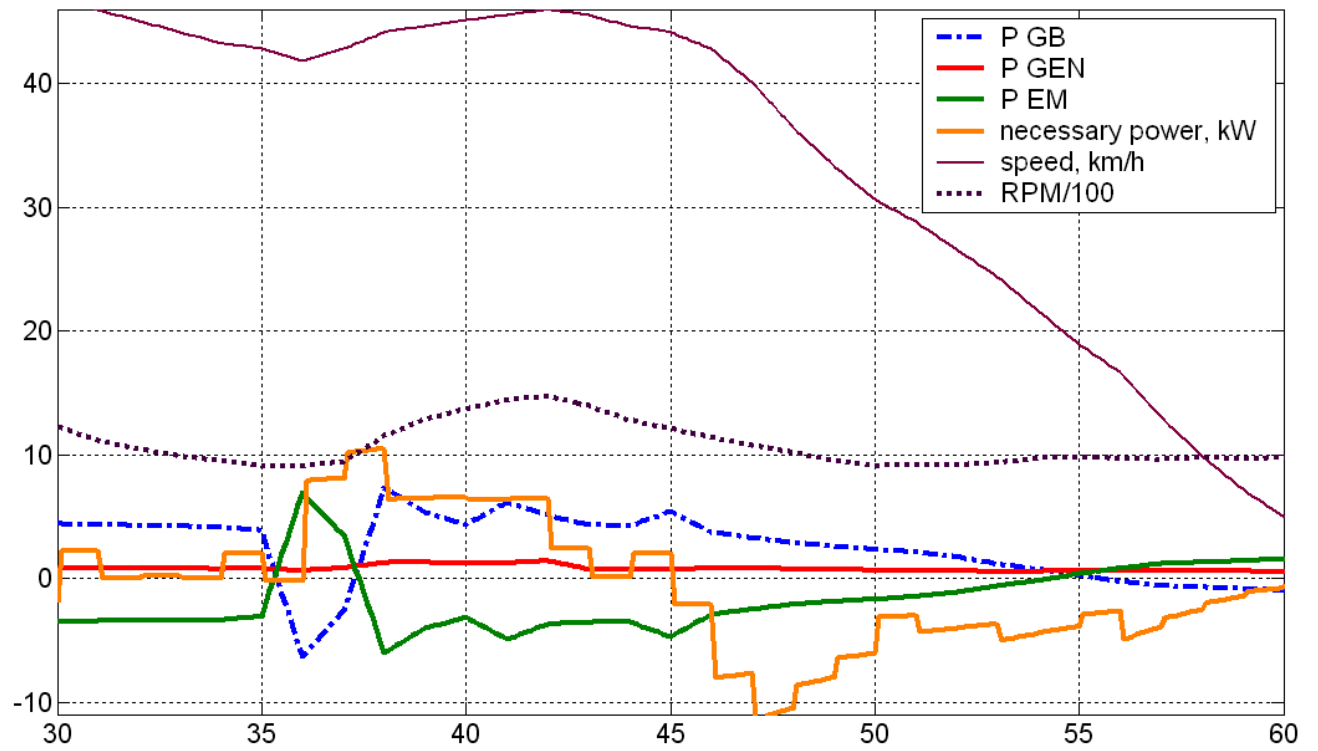
P_{EM} – потужність електродвигуна, кВт

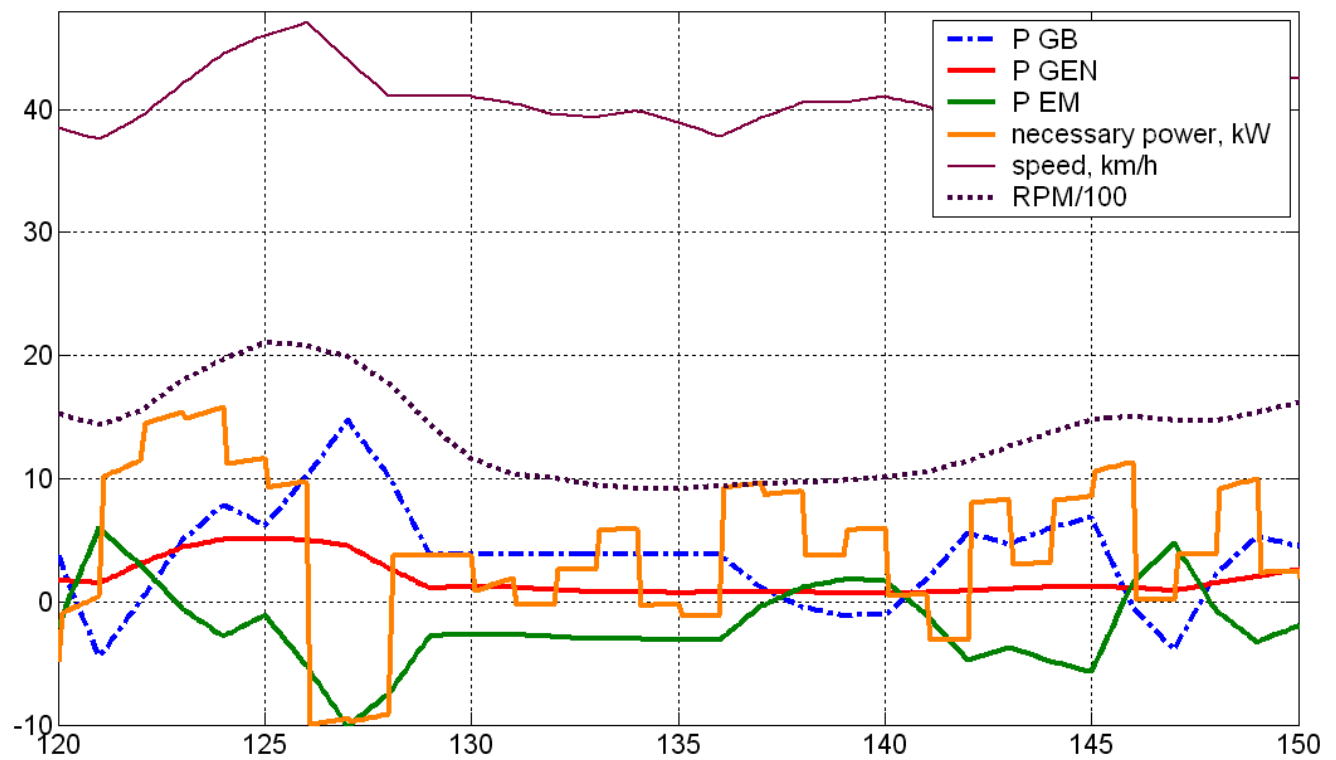
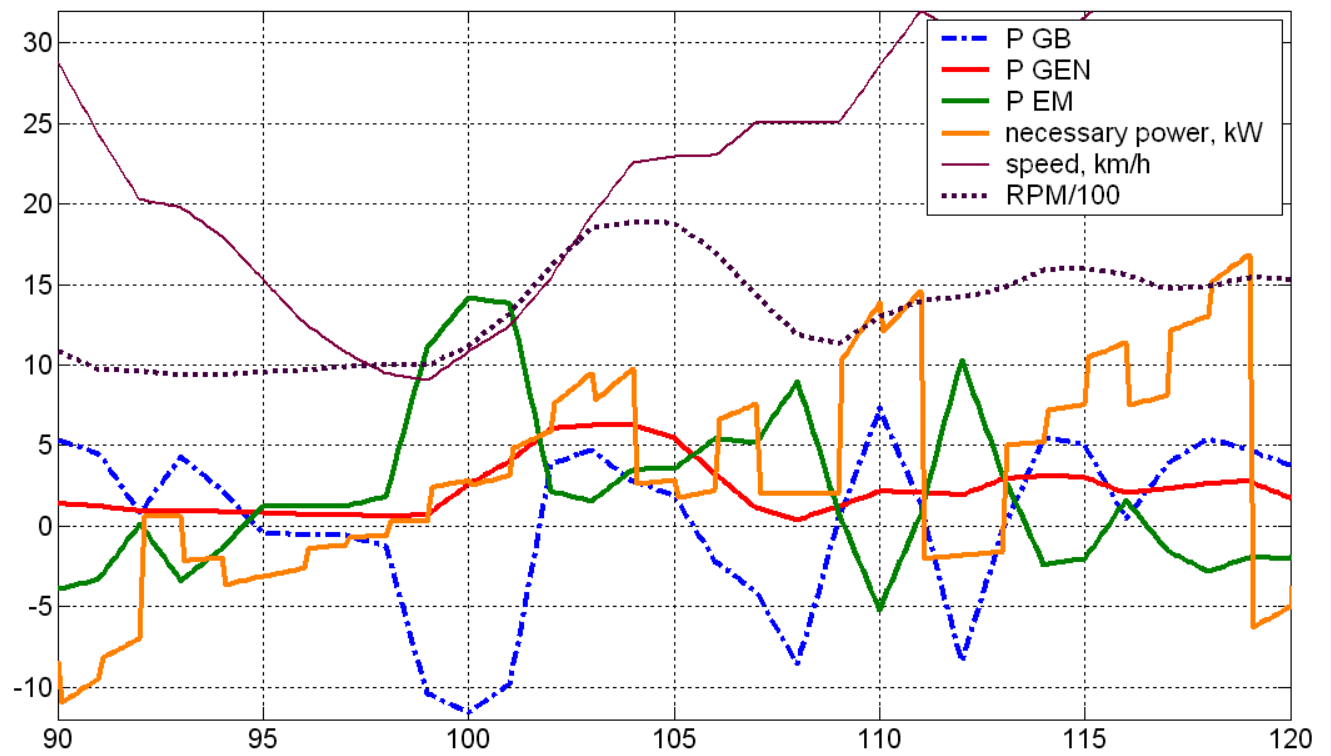
necessary power – потужність, необхідна для руху або відшкодована при рекуперації, кВт

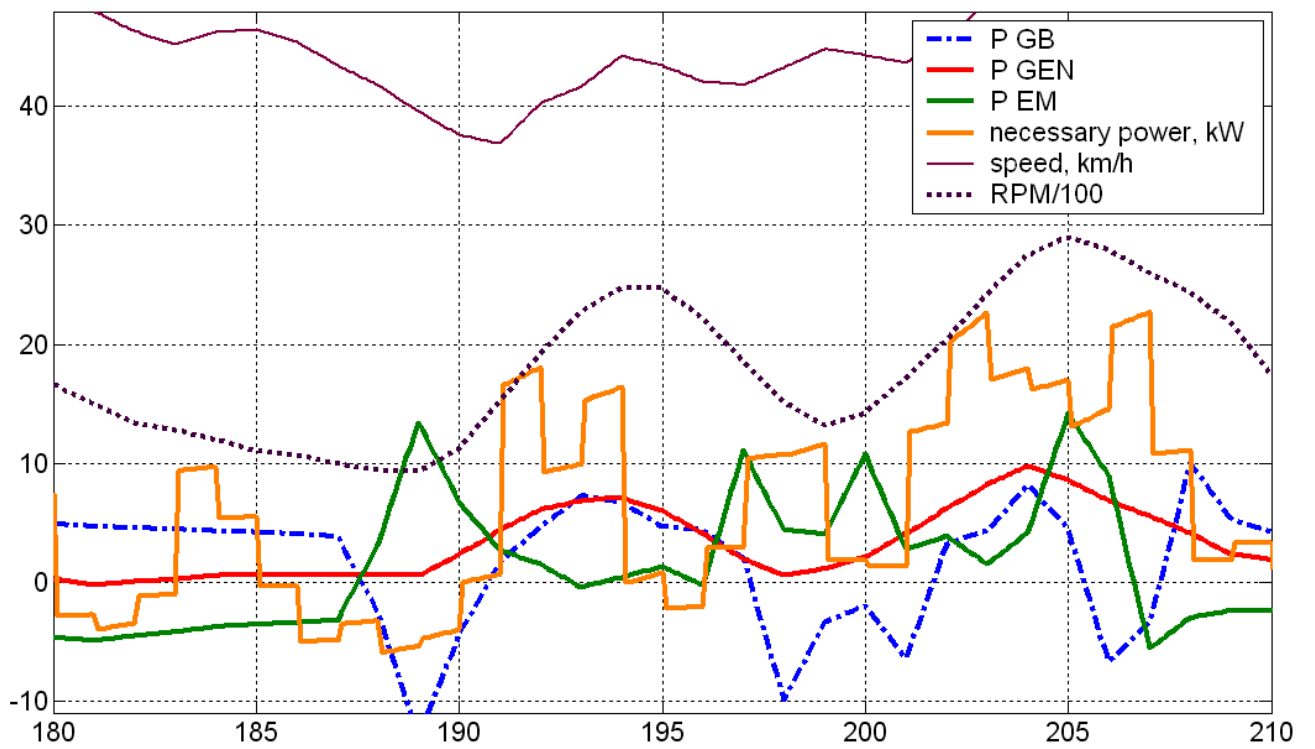
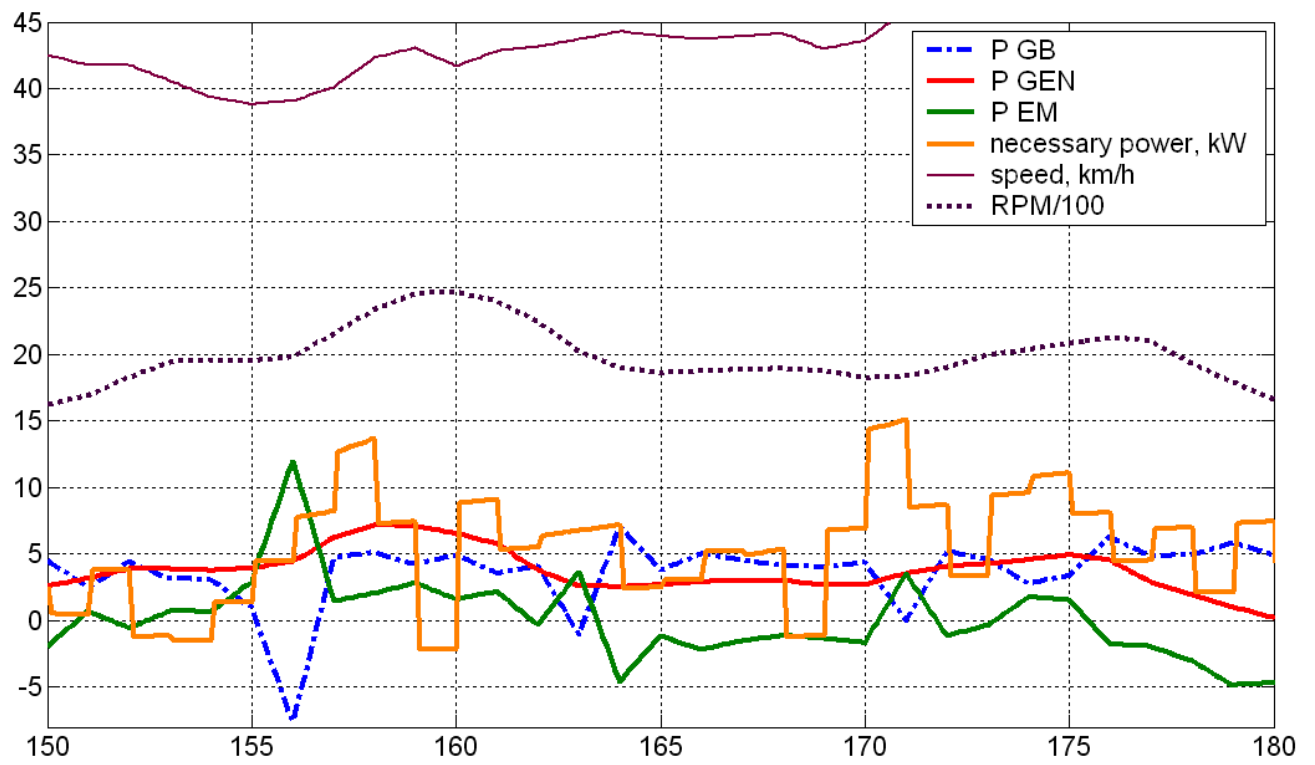
speed – швидкість, км/ч

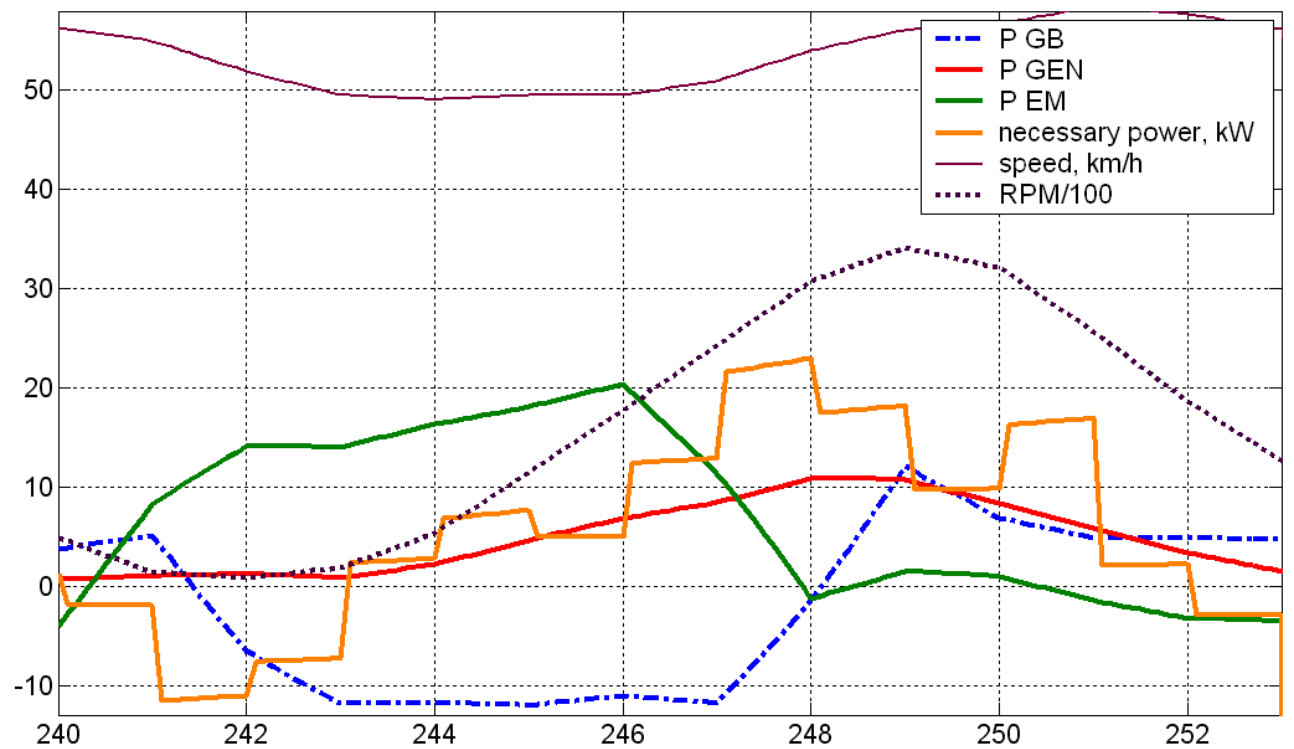
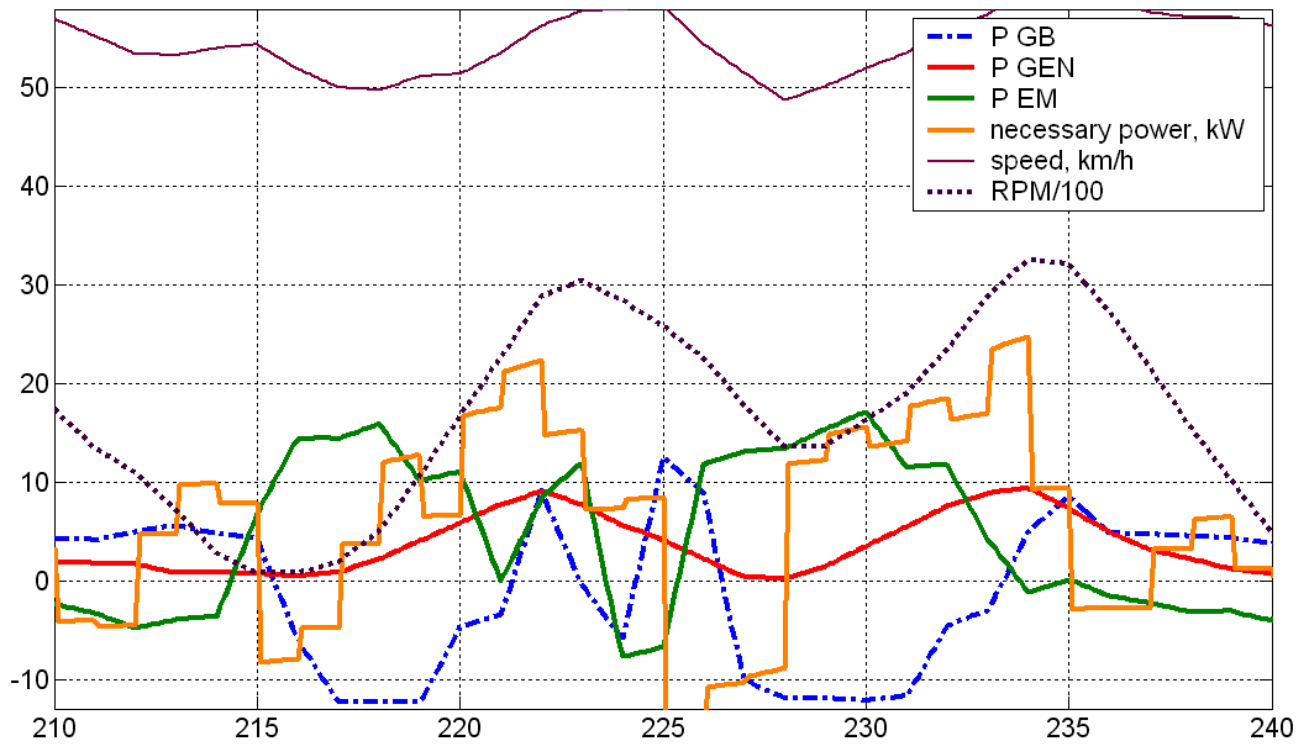
RPM/100 – оберти ДВЗ/100

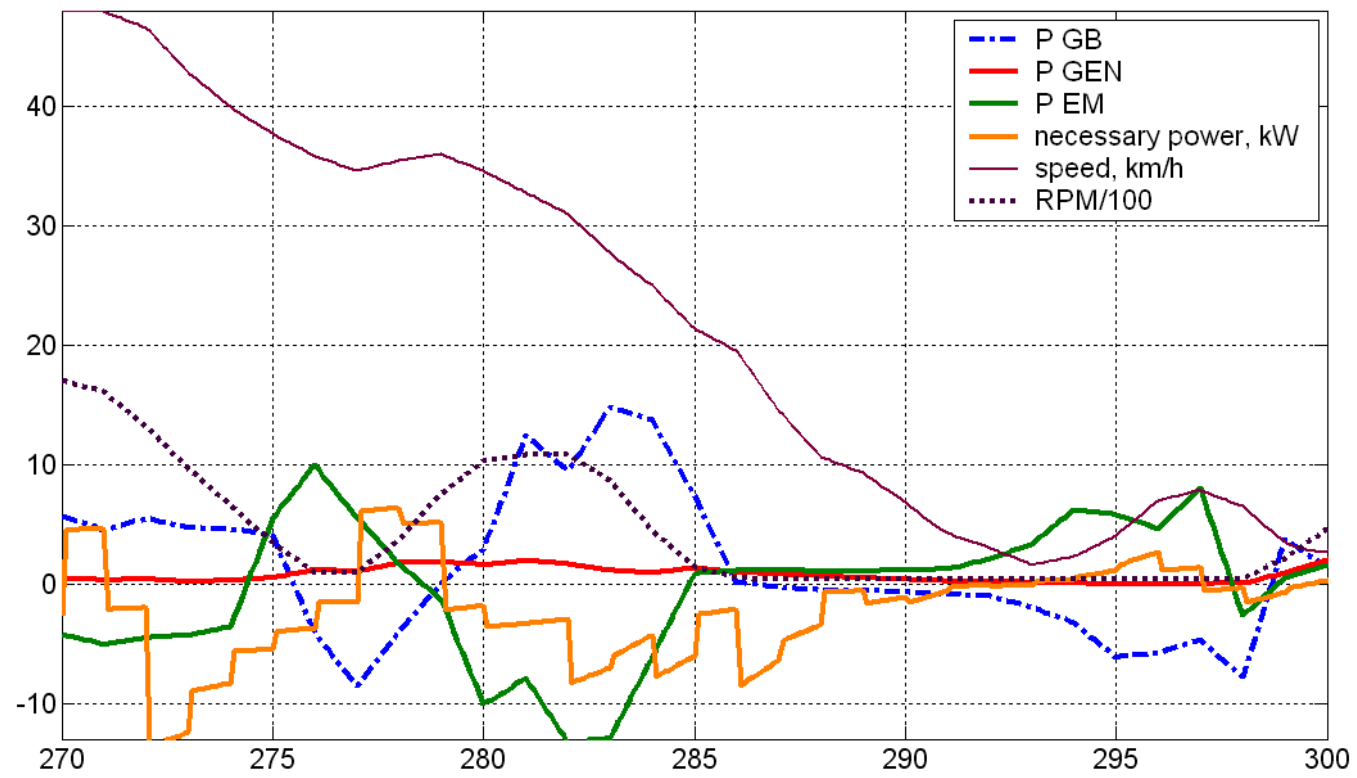
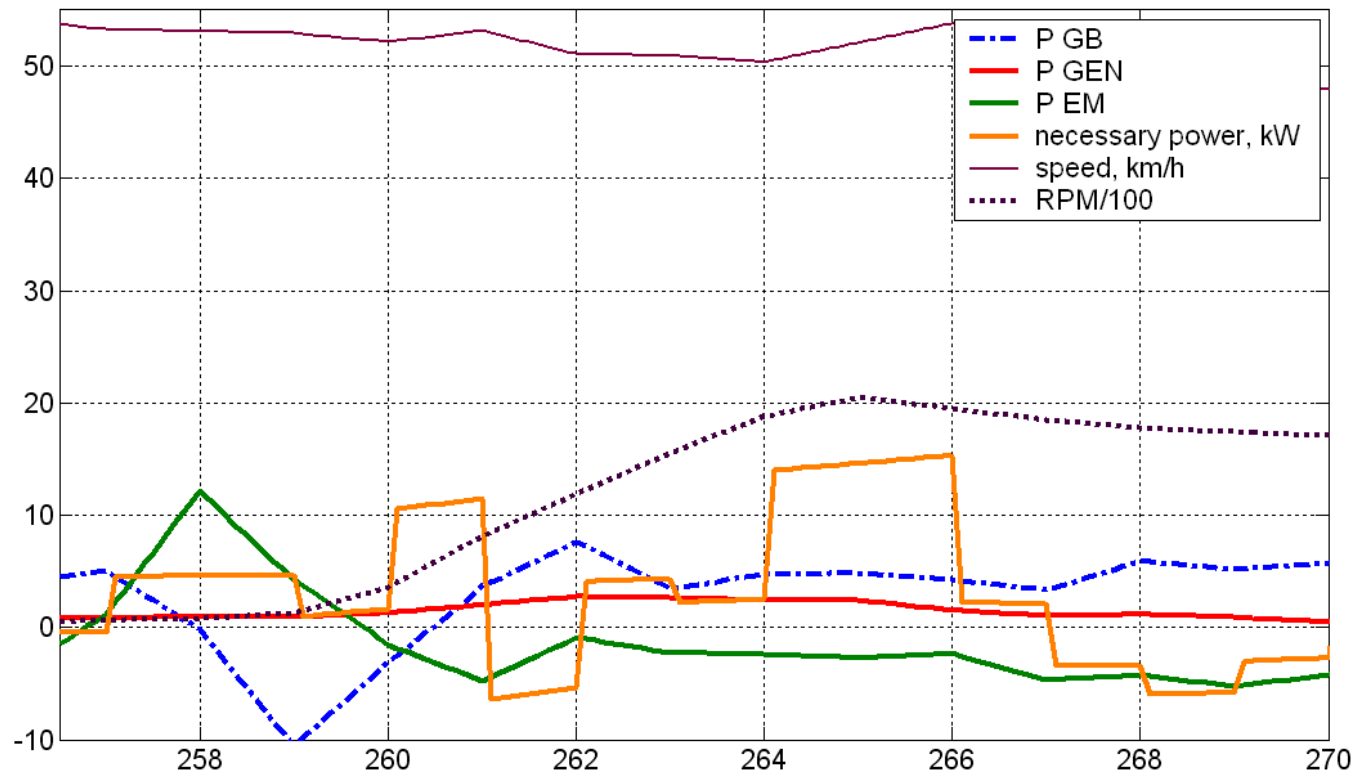


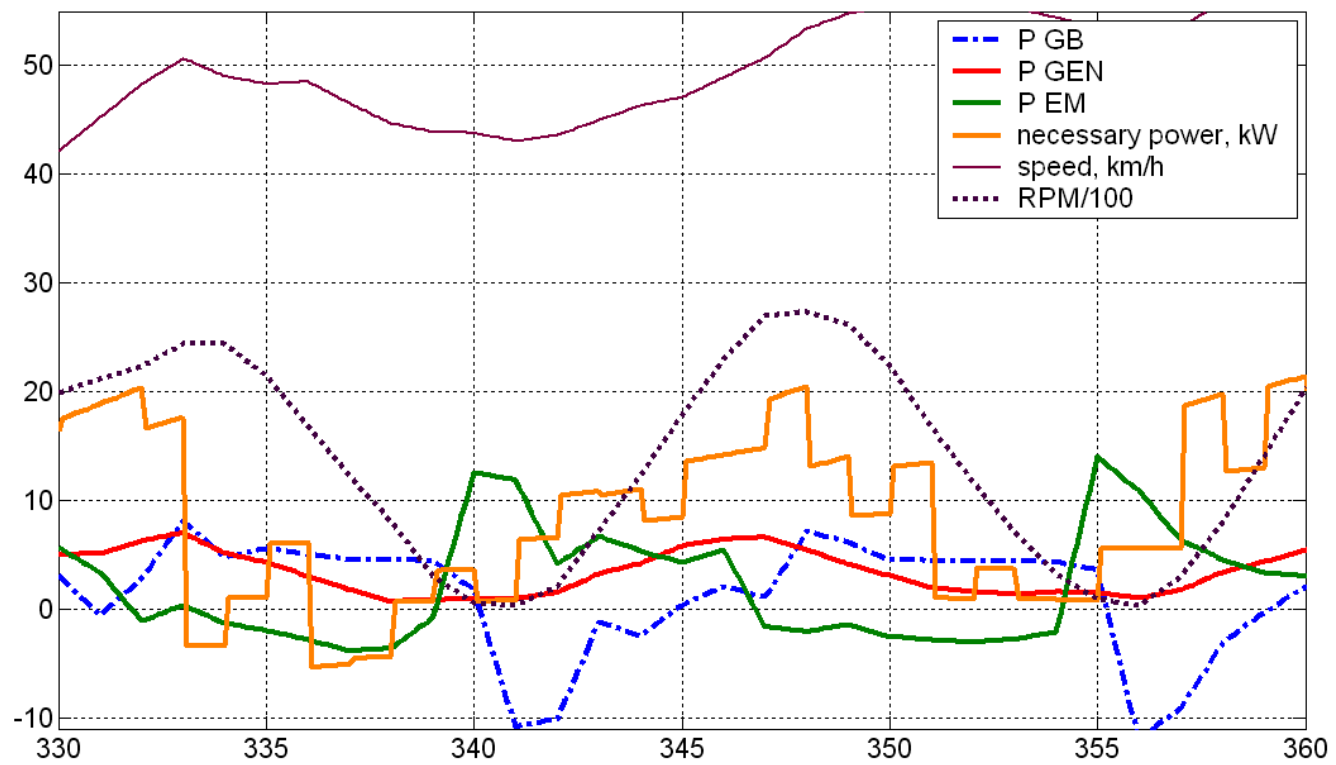
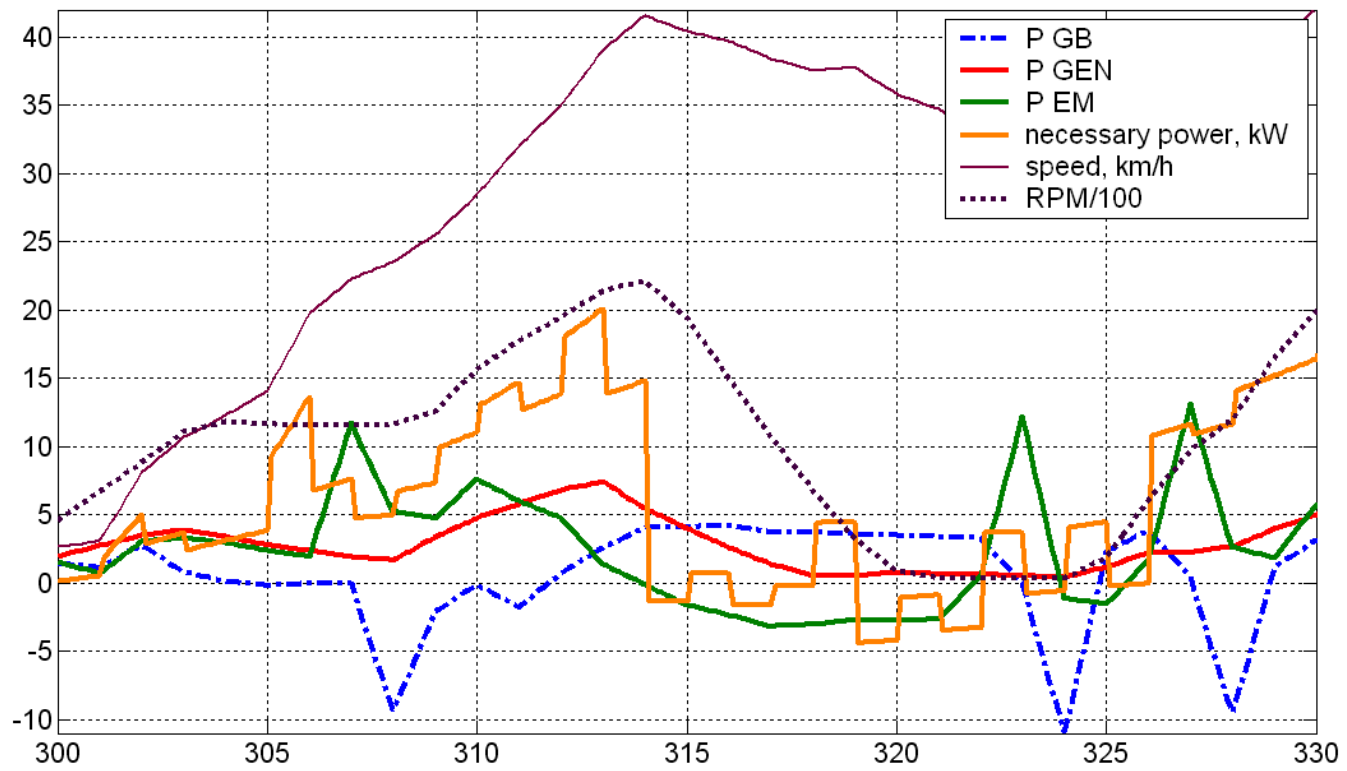


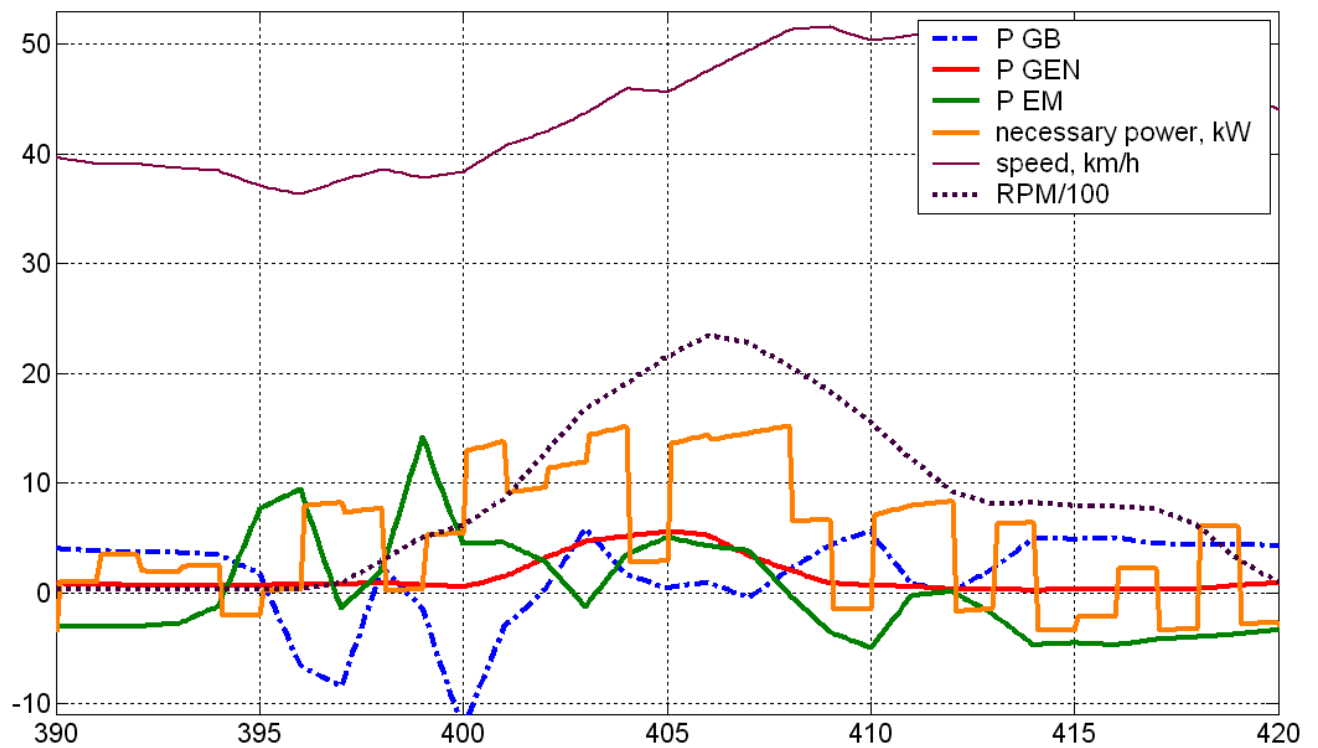
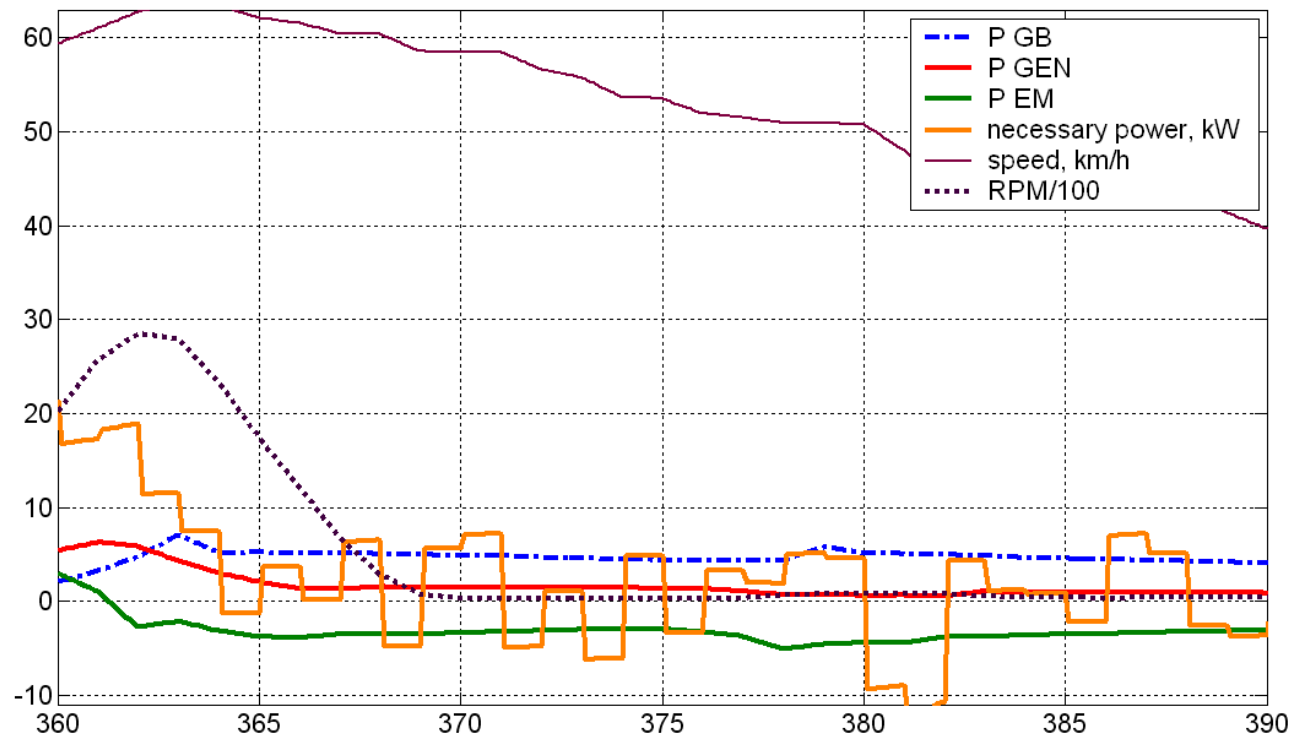


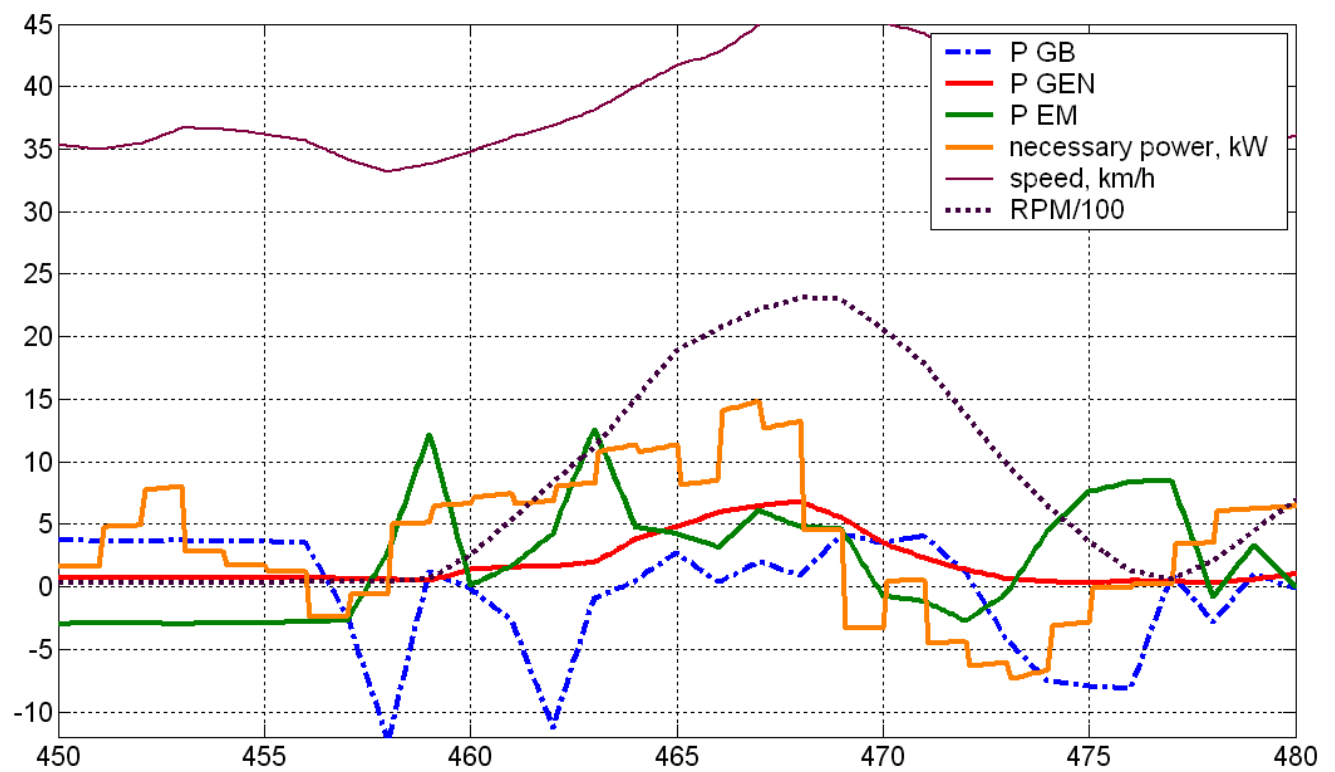
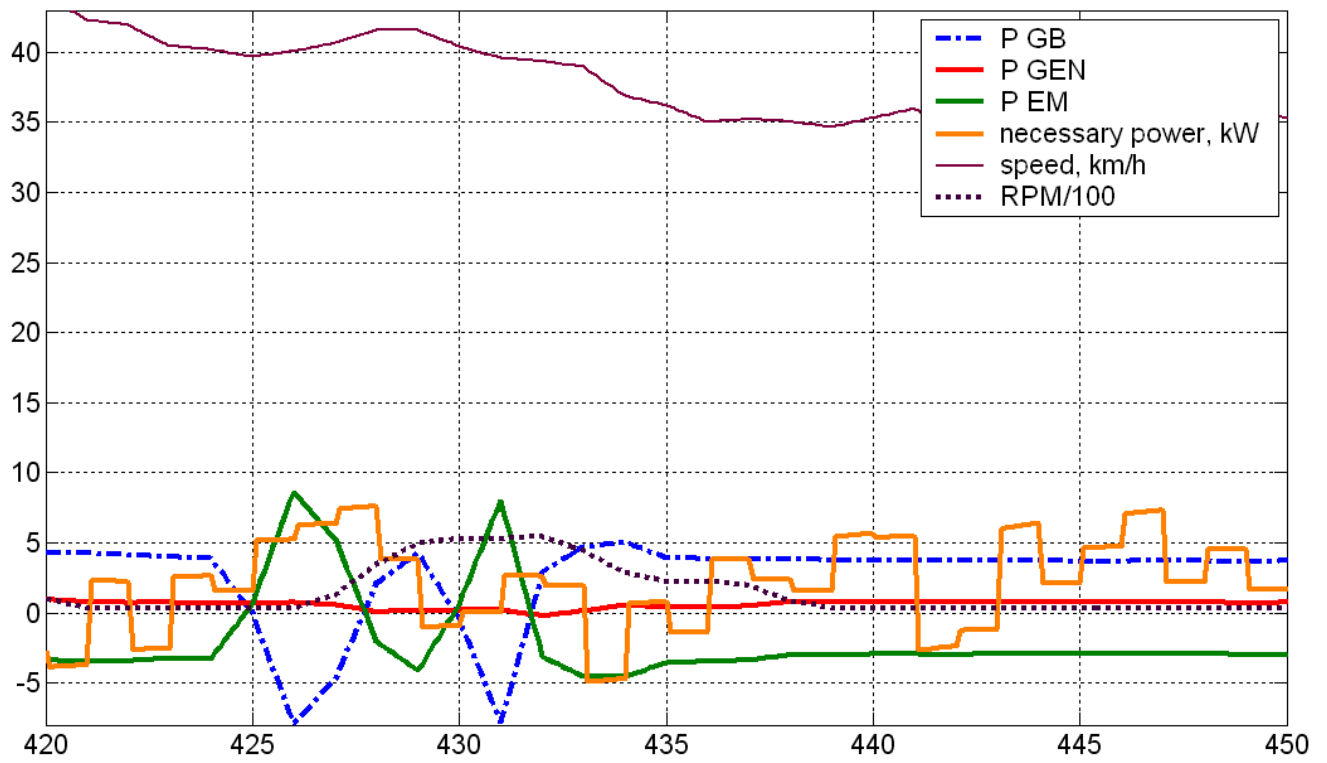


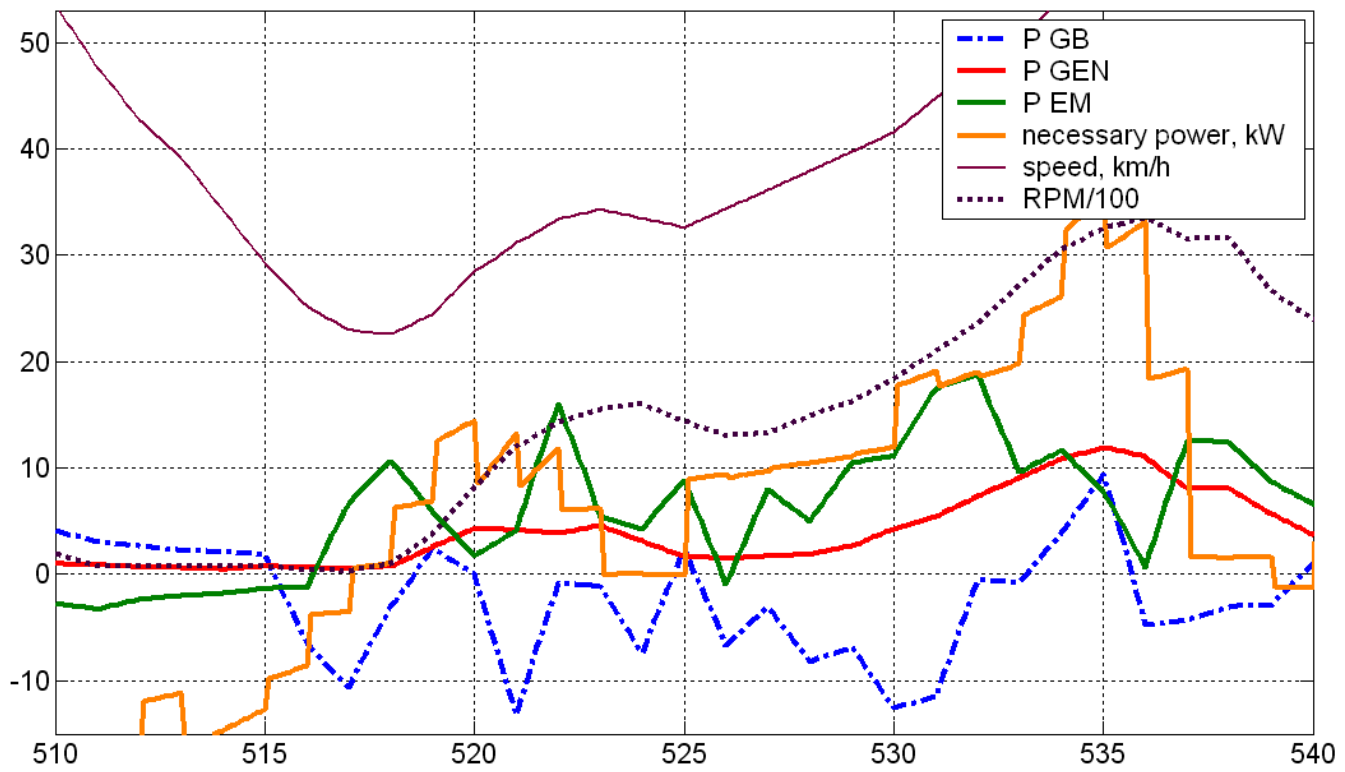
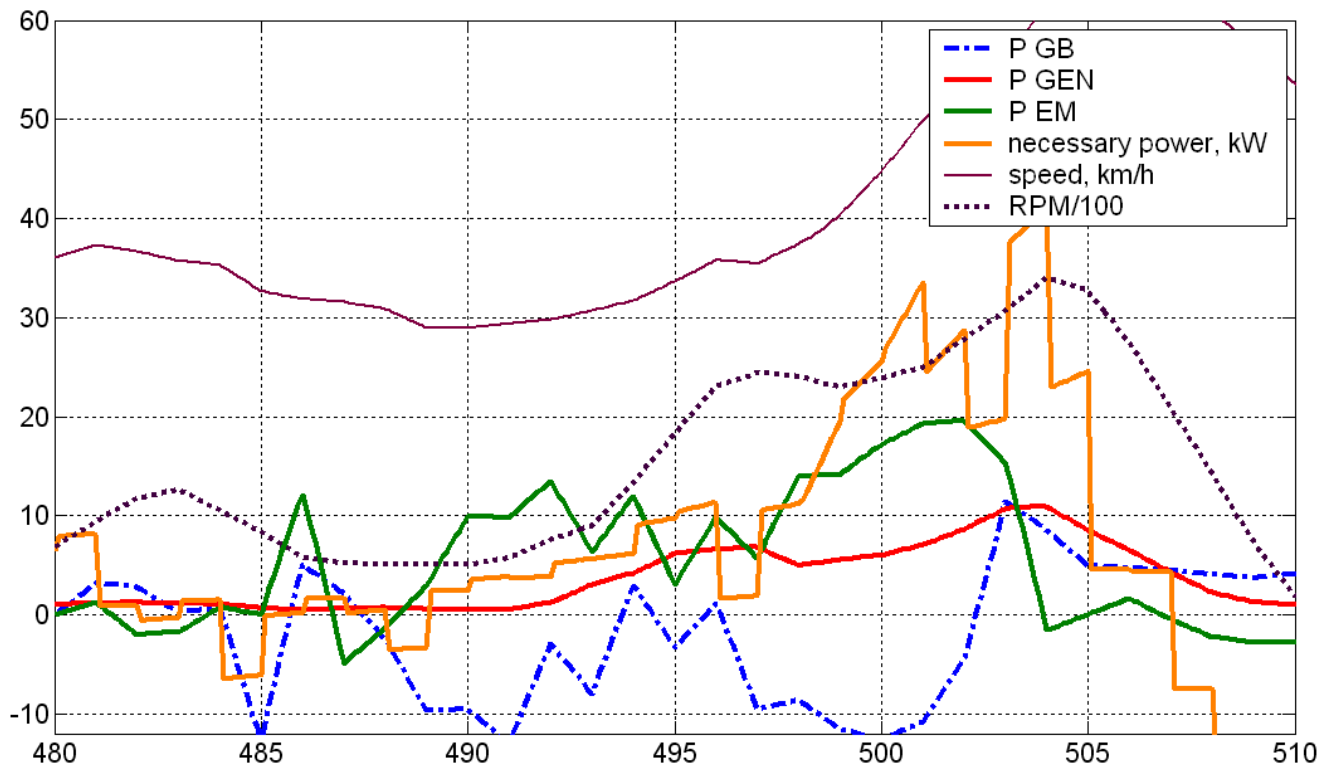


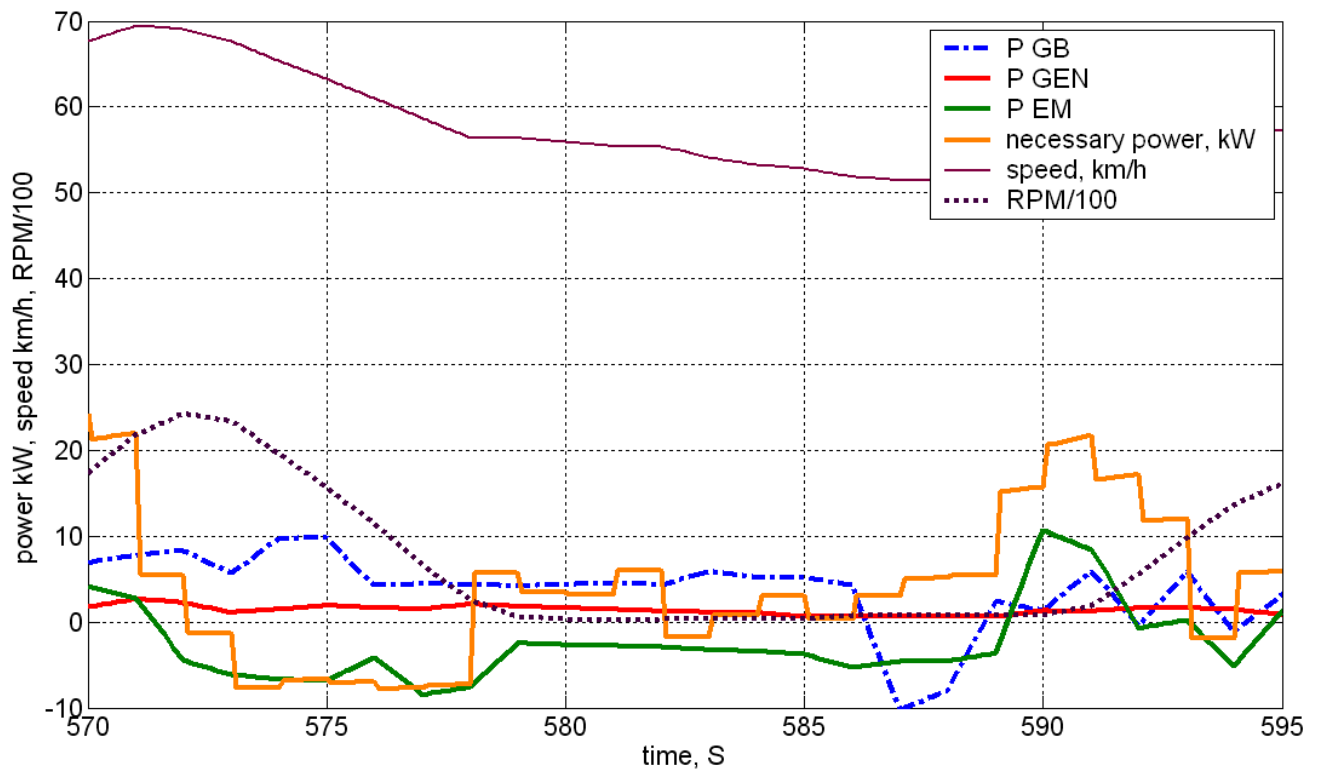
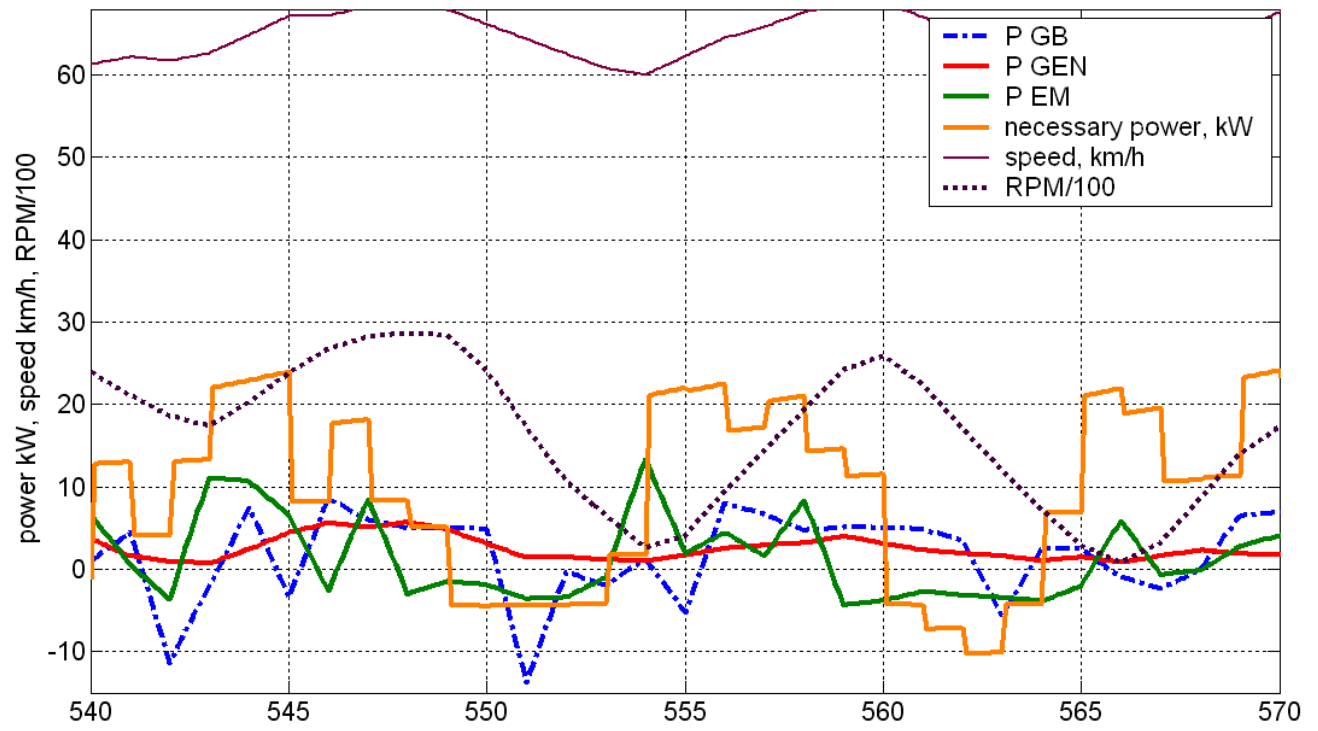












Додаток В

Акти впровадження результатів досліджень

ЗАТВЕРДЖУЮ
Т.В.О. директора ВСП
«Тернопільський фаховий коледж
Тернопільського національного
технічного університету ім. І. Пулюя»
Віталій ВОЛОШИН
08 2022 р.



АКТ

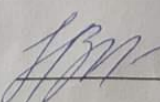
впровадження результатів дисертаційної роботи
Заверухи Руслана Романовича на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

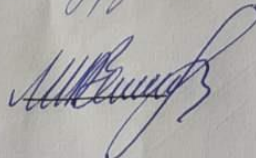
Члени комісії у складі зав. відділення телекомунікацій та електронних систем Приймака В.А., зав. відділення транспорту та інженерної механіки Залуцької Н.В та голови циклової комісії автомобільного транспорту Венгера М.П. склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи викладача автомеханічних дисциплін Заверухи Руслана Романовича, на тему «Підвищення ефективності функціональних систем силової установки гібридного автомобіля», виконаної в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті використовуються в навчальному процесі ВСП «Тернопільський фаховий коледж Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя» при підготовці фахівців освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності 274 «Автомобільний транспорт», освітнього - професійного ступеня «фаховий молодший бакалавр» спеціальності 274 «Автомобільний транспорт» освітньої програми «Обслуговування та ремонт автомобілів і двигунів» та спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньої програми «Обслуговування та ремонт електричних і електронних систем автомобілів».

Положення, розробки та науково-практичні рекомендації кандидатської дисертації використані при діагностуванні та контролі технічного стану гібридної силової установки, а також тягової акумуляторної батареї.

Розроблені положення дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес та використовуються при викладанні дисциплін: «Автомобільні електронні системи», «Електрообладнання автомобілів», «Альтернативні енергоустановки», «Електроустаткування автомобілів».

Зав. відділення
телекомунікацій та електронних систем  Віктор ПРИЙМАК

Зав. відділення
транспорту та інженерної механіки  Наталя ЗАЛУЦЬКА

Голова циклової комісії
автомобільного транспорту  Микола ВЕНГЕР

ЗАТВЕРДЖУЮ
Генеральний директор
ТОВ "ТЕРКО АВТО"
Андрій ЧАЙКА
« 08 » 2022 р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Заверухи Руслана Романовича на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

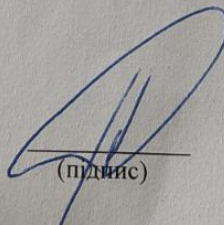
Положення, розробки та науково-практичні рекомендації кандидатської дисертації використані при діагностуванні та контролю технічного стану гібридної силової установки, а також тягової акумуляторної батареї.

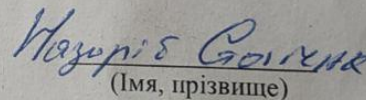
Розроблені положення дисертаційної роботи впроваджені в виробництво та використовуються для:

- контролю параметрів гібридної силової установки;
- контролю параметрів тягової акумуляторної батареї.

Особиста участь автора роботи є в розробці штучної інтелектуальної мережі діагностування гібридної силової установки автомобіля в залежності від зовнішніх умов роботи.

Начальник відділу


(підпис)


(Імя, прізвище)

Додаток Д. Відомості про апробацію результатів дисертації

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Марціяш О.М., Мурований І.С., Заверуха Р.Р. Визначення характеристик роботи електромагнітних форсунок бензинового двигуна на лабораторному стенді. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки», Луцьк, 2016, вип. 55. С. 237-240. <http://irbis-nbuv.gov.ua>cgiirbis> 64. (фахове видання).
2. Марціяш О.М., Заверуха Р.Р., Ужва А.В. Аналіз моделей стендів для дослідження параметрів системи керування бензинових ДВЗ легкових автомобілів. Автомобільний транспорт, вип. 41, 2017. С. 61-66. http://nbuv.gov.ua/UJRN/at_2017_41_11. (фахове видання).
3. Бажинов О.В., Бажинова Т.О., Заверуха Р.Р. Інформаційна комплексна система діагностики гібридних і електромобілів. *Інженерія природокористування*. Харків, 2020, №2 (16), с.12-18. ISSN 2311-1828, [https://doi.org/10.37700/enm.2020.2\(16\).12-18](https://doi.org/10.37700/enm.2020.2(16).12-18) <http://dspace.khntusg.com.ua/bitstream/123456789/13508/1/4.pdf>. (фахове видання).
4. Бажинов О.В., Заверуха Р.Р. Діагностика функціональних систем силової установки гібридного автомобіля. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*, Харків, ХНУСГ, 2020, № 21, с.195-200. <https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/2988/1/195-200.pdf>, DOI 10.37700/ts.2020.21.195-200. (фахове видання).
5. Бажинов О.В., Бажинова Т.О., Заверуха Р.Р. Метод визначення ефективної роботи силової установки гібридного автомобіля. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*, Харків, ХНУСГ, 2021, № 23, с.180-187. https://repo-btu-kharkov-ua.translate.google/handle/123456789/1329?_x_tr_sl=uk&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc

https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/1329/1/ZHurnal_TSALTK_23_2021_177_184.pdf. (фахове видання).

6. Бажинов О.В. Діагностика силової установки гібридного автомобіля/ Бажинов О.В., Бажинова Т.О., Заверуха Р.Р. – *Монографія*, Харків: ХНАДУ, 2021.-116с. ISBN 978-966-303-779-0.

https://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/bitstream/123456789/5342/1/Monografiya_Bazhynov_%20Zaverucha_21.pdf.

7. Development of a Method for Evaluating the Technical Condition of a Cars Hybrid Powertrain by Oleksiy Bazhinov, Juraj Gerlici, Oleksandr Kravchenko, Yevhen Haiek, Tetiana Bazhynova, Ruslan Zaverukha and Kateryna Kravchenko. *Symmetry* 2021, 13(12). 2356, <https://doi.org/10.3390/sym13122356> Viewed by 393. (Scopus).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Ляшук О.П., Пиндус Ю.І., Заверуха Р.Р., Пиндус Т.Б. Стенд дослідження робочих параметрів системи керування бензинових двигунів. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*, Т.1, м. Тернопіль, Тернопіль, 2015. С. <http://tntu.edu.ua/>

9. Бажинов А.В., Заверуха Р.Р. Применение систем нечеткого вывода для оценки технического состояния гибридной силовой установки автомобиля. *Збірник тез доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт та інфраструктура»*, м. Київ 23-25 квітня 2020, Київ, 2020. С. 8-10. https://nubip.edu.ua/zbirnik_tez_ati_2020_0

10. Бажинов О.В., Заверуха Р.Р. Вибір стратегії управління силовою установкою гібридного автомобіля. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Концепція розвитку електричного транспорту та його систем»*, м. Харків 7-9 квітня 2020, Харків, 2020. С. 31-32.

<https://science.kname.edu.ua/dok/2020konf>

11. Бажинов О.В., Заверуха Р.Р. Критерії оцінки технічного стану силової установки гібридного автомобіля. *Матеріали науково-практичної конференції «Службово-бойова діяльність Національної гвардії України: сучасний стан, проблеми і перспективи»*, м. Харків 2 квітня 2020. Харків 2020. С. 112-114. Nangu.ua <http://nangu.edu.ua/tez%202020seksia%204>.
12. Заверуха Р.Р. Використання інформаційних систем в управлінні гібридними силовими установками автомобілів. Збірник наукових праць П Міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерні технології і мехатроніка», Харків, 28 травня 2020, Харків, 2020. С. 347-350. <https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/dSPACE/bitstream/123456789/3607/1/347-350.pdf>.
13. Заверуха Р.Р. Обґрунтування режимів роботи гібридної силової установки автомобіля. *Матеріали МНПК «Молодь і технічний прогрес в АПВ» Інноваційні розробки в аграрній сфері*, Том 2, Харків, 7-8 травня 2020, Харків, 2020. С. 64-65. www.master2014.metalcontrol.com.ua.
14. Бажинов О.В., Заверуха Р.Р. Математична модель тягової акумуляторної батареї гібридного автомобіля. *Збірник тез доповідей IV МНПК «Автомобільний транспорт та інфраструктура»* 21-23 квітня 2021, Київ, с. 89-90. <https://dSPACE2.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/267>

Наукові праці, які додатково відображують наукові результати дисертації:

15. Заверуха Р.Р., Марціяш О. М., Пиндус Ю. І., Ляшук О. Л., Клендій В.М. Патент України на корисну модель № 115354 Лабораторний стенд для визначення характеристик роботи електромагнітних форсунок бензинового двигуна легкового автомобіля: МПК G 01F 5/00. № у 2016 11488, заявл. 06.12.2016; опубл. 10.04.2017, Бюл. № 7.
16. Заверуха Р.Р., Марціяш О.М., Калущка В.П., Клендій В.М. Патент України на корисну модель №128362 Лабораторний стенд для визначення робочих характеристик системи впорскування палива легкового автомобіля: МПК G09B 25/02. № у 2018 04380, заявл. 20.04.2018; опубл. 10.09.2018, Бюл. № 17.

17. Заверуха Р.Р., Марціяш О.М., Калушка В.П., Клендій В.М. Патент України на корисну модель №128366 Лабораторний стенд для визначення робочих характеристик безконтактної системи запалювання легкового автомобіля: МПК G 09B 25/02. № u 2018 04397, заявл. 20.04.2018; опубл. 10.09.2018, Бюл. №17.

18. Заверуха Р.Р., Марціяш О.М., Калушка В.П., Клендій В.М. Патент України на корисну модель № 123583 Лабораторний стенд для визначення робочих характеристик системи електропостачання легкового автомобіля: МПК G 09B 25/02. № u 2017 11117, заявл. 13.11.2017; опубл. 26.02.2018, Бюл. №4.