

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Теслюк Тарас Васильович



УДК 004.[9+896]

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЗБОРУ І ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ В**  
**СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ**  
**ПІДПРИЄМСТВА**

05.13.06 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

 Теслюк Т. В.

**Науковий керівник** – Цмоць Іван Григорович, доктор технічних наук,  
професор

Львів – 2018

## АНОТАЦІЯ

*Теслюк Т. В.* Методи та засоби збору і опрацювання даних в системах управління енергоефективністю підприємства. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.06 «Інформаційні технології» - Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2018.

Захист відбудеться у спеціалізованій раді Національного університету «Львівська політехніка», Львів, 2018.

Дисертацію присвячено підвищенню ефективності синтезу складових інформаційної технології управління енергоефективністю технологічних процесів з високими техніко-економічними показниками на основі розроблених та вдосконалених моделей, методів та інструментальних засобів.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та основні задачі досліджень, визначено наукову новизну роботи і практичне значення отриманих результатів, показано зв'язок роботи з науковими темами. Подано відомості про апробацію результатів роботи та особистий внесок автора та його публікації.

В першому розділі дисертаційного дослідження проаналізовано основні аспекти технології Індустрії 4.0, яка дає змогу забезпечити високий рівень конкурентоспроможності сучасних підприємств. Результати аналізу дають змогу стверджувати, що подальший розвиток енергетичного сектору України неможливий без впровадження принципів технології “Industry 4.0”.

Проведено аналіз існуючих систем та стандартів управління підприємствами, а саме: ANSI ISA-95 та IEC 62264-1. Застосування стандарту ANSI ISA-95 дає змогу зменшити час для інтеграції системи управління на підприємстві, підвищити успішність завершення інтеграції системи, зменшити витрати на розгортання системи, оскільки використовують стандартні формати та програмні модулі. Ґрунтуючись на проведеному аналізі розроблено базову

структуру системи управління технологічними процесами, яка складається з трьох рівнів: збору даних та управління виконавчими механізмами; контролю та управління технологічними процесами; операторського контролю та формування управлінських рішень.

На основі вищепроведеного аналізу сформовано вимоги до розроблення базових засобів багаторівневої системи управління енергоефективністю підприємства (БСУЕП), в саме: доцільно використовувати такі підходи: перший – на основі використання універсальних обчислюваних засобів (комп'ютерів, мікропроцесорів і мікроконтролерів) шляхом розроблення спеціалізованого програмного забезпечення; другий – з використанням спеціалізованих засобів ПЛІС, які апаратно реалізують алгоритми роботи засобів БСУЕП; третій – з використанням функціонально-орієнтованих засобів (систем на кристалі, універсальних обчислювальних засобів доповнених апаратними розширювачами, які реалізують базові алгоритми та складні базові операції). Пропонується розроблення вискоелективних засобів збору та опрацювання в БСУЕП здійснювати на основі комплексного підходу, який ґрунтується на можливостях сучасної елементної бази та охоплює методи і алгоритми опрацювання даних, архітектури компонентів, враховує вимоги конкретних застосувань та інтенсивності надходження даних.

Проаналізовано базові елементи для синтезу програмних та апаратних засобів збору і опрацювання даних в БСУЕП та інтерфейси комунікації між ними. Визначено їх переваги і недоліки та особливості практичного використання.

На основі проведеного аналізу та дослідження, сформовано вимоги до БСУЕП та обґрунтовано її реалізацію на основі модульно-ієрархічного підходу з використанням готових елементів і базових проектних рішень та таких принципів: системної інтеграції, змінного складу обладнання, модульності побудови, відкритості та сумісності програмно-апаратного забезпечення.

На основі проведеного аналізу сформовано завдання дисертаційного дослідження.

В другому розділі вдосконалено метод синтезу засобів збору і опрацювання даних в системах управління енергоефективністю підприємства, який за рахунок врахування інтерфейсів, вимог технічного завдання та використання інтегрального критерію ефективності компонентів забезпечує зменшення апаратних та часових затрат від 10 до 40 % та синтез засобів багаторівневих систем з високими техніко-економічними показниками.

Розроблено інформаційну модель структур синтезованих складових БСУЕП, яка базується на використанні теорії графів та кортежів і дає змогу формалізувати базову структуру та модифікувати її в процесі вдосконалення.

Побудовано метод безконфліктного обміну даними, який за рахунок узгодження інтенсивності надходження даних з інтенсивністю доступу до засобів обміну забезпечує визначення мінімальної швидкодії пам'яті для синтезу засобів обміну в реальному часі, що зменшує вартість засобів обміну та енергоспоживання. Розроблено пристрій збереження та обміну в БСУЕП з промисловою мережею, в якому завдяки використанню методу часового розподілу ресурсів пам'яті, забезпечено безконфліктний обмін даними у реальному часі та збільшено множину зовнішніх пристроїв, що реалізують режим звертання багатьох до багатьох.

Вдосконалено метод обчислення сигналу постсинаптичного збудження нейронних елементів в штучних нейронних мережах, який ґрунтується на паралельному таблично-алгоритмічному обчисленні скалярного добутку з використанням двох і більше таблиць та забезпечує зменшення в два і більше разів час опрацювання технологічних даних.

В третьому розділі побудовано тривірневу базову архітектуру БСУЕП із змінним складом обладнання, яка має постійне ядро та змінні модулі за допомогою яких забезпечується адаптація системи до вимог конкретного підприємства. Ядром розробленої БСУЕП є інтернет-сервер, сервери баз даних другого і третього рівнів управління та засоби зв'язку. Змінними модулями для першого рівня управління є - давачі, виконавчі механізми та мікроконтролерні

системи, для другого рівня - програмовані логічні контролери та однокристальні комп'ютери, а для третього – персональні комп'ютери.

Розроблено алгоритми функціонування системи та побудовано моделі динамічного аналізу функціонування засобів інформаційної технології багаторівневого управління енергоефективністю, які за рахунок використання теорії простих, кольорових та ієрархічних мереж Петрі, забезпечують прийняття рішення про відповідність функціонування системи згідно з вимогами технічного завдання. Наведено результати аналізу розроблених засобів збору та опрацювання даних з використанням побудованих моделей на основі простих та ієрархічних мереж Петрі у формі графів досяжності станів в яких може перебувати кожна з досліджуваних складових. Отримані результати дають змогу стверджувати, що усі стани є досяжними, мережа є живою, а тупикові стани - відсутні.

В четвертому розділі дисертаційної роботи розроблено структуру інформаційної технології збору та опрацювання даних в БСУЕП. Побудовано структуру та алгоритм функціонування системи синтезу елементів системи управління енергоефективністю підприємства, яка ґрунтується на модульному принципі та включає наступні складові: підпрограму для вибору елементної бази згідно із техніко-економічними показниками; підпрограму для синтезу структури компонентів для системи управління енергоефективністю технологічного процесу на підприємстві.

Розроблено програмне та інформаційне забезпечення системи синтезу елементів системи управління енергоефективністю підприємства, яка базується на базі даних SQLite та написана на мові Java. Дана програма є кросплатформова і може працювати на різних операційних системах.

Розроблено структуру, сценарії роботи нейроконтролера для управління інтелектуальною теплицею. Побудовано програмне та технічне забезпечення нейроконтролера, яке базується на мікроконтролері STM32F103 і використовується у якості центрального модуля нейроконтролера. Описано структура нейроконтролера та алгоритми його роботи. Програмне забезпечення

реалізовано на мові С. Наведено результати дослідження інтелектуального компонента системи управління енергоефективністю технологічних процесів.

Наведено результати синтезу базового елемента, який складається з мікроконтролера, давача температури, обігрівача та модуля зв'язку. Було згенеровано 284 альтернативи, з яких було вибрано варіант з більшим значення цільової функції. Окрім того, наведено результати синтезу складових системи управління енергоефективністю підприємства з врахуванням інтерфейсів базових елементів та результати ефективності розв'язання задачі структурного синтезу.

Ключові слова: інформаційна технологія, кольорові та ієрархічні мережі Петрі, метод синтезу з врахуванням інтерфейсів, метод безконфліктного обміну даними, метод побудови інтелектуальних засобів опрацювання даних.

## SUMMARY

By T.V. Teslyuk. Methods and techniques for data acquisition and processing in control systems for energy efficiency at an enterprise. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis submitted for the degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy): specialty No 05.13.06 – Information Technologies – at Lviv Polytechnic National University, Lviv 2018.

Thesis defense is to be held under the session of a specialized board of Lviv Polytechnic National University, Lviv 2018.

The thesis is on boosting the synthesis efficiency of the information technology components of the control for energy efficiency of manufacturing operations with high technical and economic indicators based on the models, methods, and tools developed and improved.

In the introduction the relevance of the thesis topic is justified; the purpose and main objectives of the study are formulated; the scientific novelty of the work and the practical significance of the results obtained are identified; the connection with the scientific topics is shown. Information regarding the evaluation of work performance, the author's contribution along with the publications are provided.

The first chapter of the thesis analyzes the main aspects of Industry 4.0, which ensures a high level of modern enterprises' competitiveness. The analysis results suggest that the further progress of the power-generating sector in Ukraine could not be made unless the principles of Industry 4.0 were introduced.

The existing systems and standards of enterprise control, such as ANSI ISA-95 and IEC 62264-1 were analyzed. The application of ANSI ISA-95 standard allows the time for the integration of the enterprise control system to be reduced, the success of completing the system integration to be enhanced, and costs for the system deployment to be cut since standard formats and software modules are being used. Based on the analysis made, a basic structure of the control system of manufacturing operations has been developed. It consists of three levels—data acquisition and

actuators control, manufacturing operations management and control, operator control and formation of managerial decisions.

Based on the analysis mentioned above, the requirements on the development of basic tools for a multilevel control system for energy efficiency (MCSEE) at an enterprise were identified. Specifically, it is appropriate to use the approaches mentioned below.

The first approach is based on universal computing facilities (as computers, microprocessors, and microcontrollers) through the development of specialized software. The usage of PLDs that implement operation algorithms of the MCSEE components by means of hardware underlies a second approach. The third approach uses functional-oriented tools—chip-based systems, universal computer facilities supplemented with hardware extenders that implement basic algorithms and complex basic operations. It has been suggested to develop highly efficient data collection and processing means in the MCSEE by applying an integrated approach, which is based on the capabilities of the contemporary element base. The approach covers data processing methods and algorithms, component architecture in view of the requirements of the specific applications and data occurrence intensity.

The thesis analyzes the basic units for the synthesis of software and hardware data collection and processing means in the MCSEE and communication interfaces between them. Their advantages and disadvantages together with the peculiarities of practical use were identified.

The analysis and research conducted resulted in the requirements for the MCSEE and proved its realization by following the modular-hierarchical approach with the use of ready-made elements, basic design solutions, and the principles, including the system integration, equipment of variable composition, architecture modularity, accessibility and compatibility of hardware and software.

In the second chapter, the synthesis technique for data collection and processing means in the control systems for energy efficiency at the enterprise was improved. Through its consideration of interfaces, requirements for technical specifications and the use of an integral criterion of the components' efficiency, this



method allows us to reduce hardware costs and make it less time-consuming from 10 % to 40 %; synthesize multilevel systems with high technical and economic indicators.

An information model for the structures of the MCSEE synthesized components has been developed based on the use of a theory of graphs and tuples, allowing for the formalization of the basic structure and its modification while being improved.

The method of conflict-free data transmission has been devised, which due to coordination of the data entry intensity with the intensity of access to the communicating means, qualifies the minimum memory speed for the synthesis of communicating means in real time thus reducing their cost and power consumption. In the thesis, a device for data storage and transmission in the MCSEE with the industrial network has been designed. Owing to the use of the time allocation method of memory resources, this device provides non-conflict data transmission in real time and increases the number of external devices that implement many-to-many relationships.

In the thesis, the computing technique for a signal of postsynaptic firing of neural elements in artificial neural networks has been improved. Being based on the parallel table-algorithmic calculus of a scalar product using two or more tables, the technique is proved to reduce time of technological data processing twofold or more.

The third chapter of the thesis covers how a three-level underlying architecture of the MCSEE with the equipment of variable composition has been built. The architecture features a permanent core and replaceable modules by which the system is adapted to the requirements of a particular enterprise. The core of the MCSEE developed is represented by an internet server, database servers of the second and third levels of control, and communication facilities. The replaceable modules for the first control level are sensors, actuators, and microcontroller systems, for the second level – a PLC and operating controller, and for the third level – a PC.

The operation algorithms of the system have been developed. The dynamic analysis models of the information technology operation of the multilevel control for

energy efficiency have been built, which, through the use of simple, colored, hierarchical Petri nets, adopt a decision on whether the system operates consistently with the performance requirements. The thesis highlights the results of the analysis into developed data collection and processing means using constructed simple and hierarchical Petri net-based models represented as state reachability graphs where each of the studied components can be found. The results yielded show that all states are proved to be reachable, the network to be living, and dead states to be absent.

The fourth chapter covers how the structure of information technology for data collection and processing in the MCSEE was devised. The structure and operation algorithm of the synthesis system of the elements of the control system for energy efficiency at the enterprise have been created based on a modular principle, including the following components—a sub-procedure for the selection of the element base with respect to technical and economic features; a sub-procedure to synthesize the components' structure of the process control system for energy efficiency at the enterprise.

For the synthesis system of the elements of the process control system for energy efficiency at the enterprise, the software written in Java and information support, based on SQLite database, are developed. This program is a cross-platform and may run different operating systems.

The structure and scenarios for the neurocontroller performance were developed to manage a smart greenhouse. By using STM32F103 microcontroller as a neurocontroller core module, the software and maintenance support for the neurocontroller were designed. The neurocontroller structure and its operating algorithms were described. Software was written in C. In this thesis, the results of the study on the intelligent component of the process control system for energy efficiency were presented.

The results of the synthesis of the basic unit, consisting of a microcontroller, a temperature sensor, a heater, and a communication module, are presented. 284 alternatives were identified, from which the option with a larger value of the objective function was chosen. In addition, the results of the synthesis of the

components of the control system for enterprise's energy efficiency are given, considering the interfaces of the basic units as well as the results of the problem-solving effectiveness of the structural synthesis.

Key words: information technology, colored and hierarchical Petri nets, synthesis technique in view of interfaces, conflict-free data transmission method, design method of intelligent tools for data processing.

**Scientific papers, in which the main scientific results of the dissertation are published**

1. Теслюк Т.В., Цмоць І.Г., Ємець В.Ф., Зелінський А.Я., Коваль В.Я. Метод синтезу структур компонентів системи управління технологічними процесами. *Моделювання та інформаційні технології: Збірник наукових праць. Інститут моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України*. 2018. Вип.83. С. 165–173.

2. Teslyuk T., Tsmots I., Teslyuk V., Medykovskyy M., Opotyak Y. Architecture and Models for System-Level Computer-Aided Design of the Management System of Energy Efficiency of Technological Processes at the Enterprise. In: Shakhovska N., Stepashko V. (eds) *Advances in Intelligent Systems and Computing II. CSIT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham. 2017. Vol. 689. – P. 538–557.

3. Цмоць І.Г., Теслюк Т.В., Машевська М.В., Теслюк В.М. Модель організації обміну та збереження даних у багаторівневих системах управління технологічними процесами. *Науковий Вісник НЛТУ України*. 2017. Вип. 27. № 1, С. 197–202.

4. Цмоць І.Г., Цимбал Ю.В., Скорохода О.В., Хавалко В.М., Теслюк Т.В. Апаратна реалізація нейромережових засобів шифрування-дешифрування інформаційних потоків даних. *Моделювання та інформаційні технології: Збірник наукових праць. Інститут моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України*. 2018. Вип. 82. С. 117–123.

5. Tsmots I., Teslyuk V., Teslyuk T., Ihnatyev I. Basic Components of

Neuronetworks with Parallel Vertical Group Data Real-Time Processing. In: Shakhovska N., Stepashko V. (eds) *Advances in Intelligent Systems and Computing II. CSIT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham. 2017. Vol. 689. P. 558–576.

6. Tsmots I., Medykovsky M., Skorokhoda A., Teslyuk T. Design of Intelligent Component of Hierarchical Control System. *ECONTECHMOD. An International Quarterly Journal*. 2016. Vol. 05. No. 2. P. 3–10.

7. Цмоць І.Г., Теслюк Т.В. Структура та моделі роботи системи управління мікрокліматом мінітеплиці. *Комп'ютерні науки та інформаційні технології: Вісник НУ "ЛП"*. 2016. № 843. С. 228–237.

8. Цмоць І.Г., Теслюк Т.В. Коваль В.Я., Веніков Д. П., Притуляк Я. Г. Розроблення інформаційних моделей та БД для системи автоматизації структурного синтезу з використанням морфологічного методу. *Моделювання та інформаційні технології: Збірник наукових праць. Інститут моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України*. 2018. Вип. 82. С. 185–192.

9. Теслюк Т., Цмоць І., Опотяк Ю., Теслюк В. Архітектура багаторівневої системи управління енергоефективністю регіону. *Комп'ютерні науки та інформаційні технології: Вісник НУ "ЛП"*. 2017. № 864. С. 201–209.

10. Денисюк П.Ю. Теслюк В.М., Перейма М.Є., Теслюк Т.В. Використання ієрархічних мереж Петрі для моделювання МЕМС. *Науковий Вісник НЛТУ України*. 2011. Вип. 21.17. С. 340–343.

11. Береговський В.В., Теслюк В.М., Денисюк П.Ю., Теслюк Т.В. Методи та моделі автоматизованого проектування системи "Інтелектуального будинку" на базі нейроконтролерів. *Науковий вісник НЛТУ України*. – 2016. – Вип. 26.7, С. 342-349.

12. Теслюк Т. Аналіз динаміки функціонування багаторівневих систем з використанням моделей на основі ієрархічних мереж Петрі. *Науковий Вісник НЛТУ України*. 2018. Том. 28. № 8. С. 149–154.

13. Цмоць І.Г., Батюк А.Є., Яворський А.В., Теслюк Т.В. Система моніторингу технологічних процесів «розумного підприємства». *Комп'ютерні*

науки та інформаційні технології: Вісник НУ “ЛП”. 2018. № 887. С .10–17.

14. Теслюк Т. В., Зелінський А.Я., Угрин Л.Є., Коваль В. Я. Система розв’язання задач багатокритеріальної оптимізації з використанням побудови множини оптимальних рішень – Парето. *Моделювання та інформаційні технології: Збірник наукових праць. Інститут моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України*. 2018. Вип. 82. С. 148–153.

15. Teslyuk T.V., Tsmots I.G., Teslyuk V.M., Medykovskyy M.O. Optimization of the structure of wind power station with the use of the branch and bound method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 2, Issue 8 (86). P. 4–9.

16. Teslyuk V., Beregovskiy V., Denysyuk P., Teslyuk T. Lozynskiy A. Development and Implementation of the Technical Accident Prevention Subsystem for the Smart Home System. *I.J. Intelligent Systems and Applications*, Jan. 2018. Vol. 10, No. 1, P. 1–8.

17. Teslyuk T., Tsmots I., Teslyuk V., Medykovskyy M., Opotyak Y. Architecture of the management system of energy efficiency of technological processes at the enterprise. *Proc. of the XII-th Intern. Conf. of Computer Science & Information Technologies 2017 (CSIT'2017)*. Lviv. 2017. P. 429–433.

18. Teslyuk T.V., Tsmots I.H., Teslyuk V.M., Medykovskyy M.O., Holovaty A.I. Intelligent components of multilevel system for energy efficiency management in regional economy. *Proc. of the XIV Intern. Conf. on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2017)*. Lviv – Polyana., Ukraine. 2017. P. 319–323.

19. Tsmots I., Skorokhoda O., Teslyuk T., Rabyk V. Design Features of Hardware and Software Tools for Intelligent Processing of Intensive Data Streams. *Proceeding of the 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing, DSMP, 23 - 27 August 2016 Lviv, Ukraine*. 2016. P. 332–335.

20. Tsmots I., Teslyuk T., Opotyak Y. Selection of Hardware Features and Synthesis of Multilevel Control System Components of Energy Efficiency of Production Processes. *Proc. of the XIV-th Intern. Conf. on Perspective Technologies*

*and Methods in MEMS Design MEMSTECH'2018*, 18 - 22 April 2018 Polyana, Lviv, Ukraine. 2018. P. 186–190.

21. Tsmots I., Skorokhoda O., Tsymbal Y., Teslyuk T., Khavalko V. Neural-Like Means for Data Streams Encryption and Decryption in Real Time. *Proceeding of the 2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing, DSMP*, 21 - 25 August 2018 Lviv, Ukraine. 2018. P. 438–443.

22. Teslyuk T., Denysyuk P., Savitska O., Kobyliuk Y., Voronyak R. Modeling of Mobile Robot Systems Using Petri Nets. *Proc. of the IX-th Intern. Conf. on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH'2013)*. Lviv: Publisher Lviv Polytechnic Publishing House. 2013. P. 169–171.

23. Denysyuk P., Matviichuk K., Duda M., Teslyuk T., Kobyliuk Y. Technical Support for Mobile Robot System RoboCAD. *Proc. of the XIIth Inter. Conf. On Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, (CADSM'2013)*. Lviv-Polyana, Ukraine. 2013. P.431–432.

24. Denysyuk P., Teslyuk T., Teneta K., Medvid A., Sherstniakova O. An Algorithm of Determining the Direction of Motion of Mobile Robotic System. *Proc. of the IX-th Intern. Conf. on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design 2013 (MEMSTECH'2013)*. Lviv: Publisher Lviv Polytechnic Publishing House. 2013. P. 149–150.

25. Denysyuk P., Teslyuk T., Beregovskyy V., Cheremisin I., Duda M. Neural Controller of Intelligent Building Climate Control Subsystem on the Basis of a Multilayer Perceptron. *Proc. of the VII-th Intern. Conf. of Computer Science & Information Technologies 2012 (CSIT'2012)*. Lviv: Publisher Lviv Polytechnic. 2012. P. 26–27.

26. Teslyuk T., Denysyuk P., Kernytskyy A., Teslyuk V. Automated Control System for Arduino and Android Based Intelligent Greenhouse. *Proc. of the XIth Inter. Conf. on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, (MEMSTECH'2015)*. Lviv-Polyana, Ukraine. 2015. P. 7–10.

27. Теслюк Т. В., Цмоць І. Г., Медиковський М. О., Машевська М. В., Теслюк В. М. Система автоматизованого синтезу пристроїв на базі

мікроконтролерів. *Матеріали VIII-ої Українсько-польської науково-практичної конференції “Електроніка та інформаційні технології” (ЕЛІТ-2017), 27-30 серпня 2017. Львів-Чинадієво, Україна. 2017. С. 142–145.*

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	20
ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ ПІДПРИЄМСТВА	28
1.1 Аналіз особливостей технологій Індустрії 4.0	28
1.2 Аналіз архітектур систем управління енергоефективністю підприємства	31
1.3 Підходи до синтезу складових багаторівневих систем управління енергоефективністю підприємства	36
1.4 Давачі та актюатори систем управління енергоефективністю підприємства	39
1.5 Аналіз засобів опрацювання даних в системі системи управління енергоефективністю підприємства	42
1.5.1 Аналіз сучасних мікроконтролерів	42
1.5.2 Аналіз сучасних мікрокомп'ютерів	48
1.6 Аналіз програмних засобів	49
1.7 Формування вимог та вибір принципів розробки системи управління енергоефективністю підприємства	52
1.8 Висновки до розділу 1	56
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ ОБМІНУ ТА ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ	58
2.1 Розроблення методу вибору елементної бази для синтезу засобів збору та опрацювання даних в багаторівневої системи управління підприємством	58
2.2 Метод синтезу складових багаторівневої системи управління енергоефективністю підприємства	65
2.3 Розроблення засобів автоматизованого синтезу засобів збору та опрацювання даних в багаторівневої системи управління енергоефективністю підприємства	72
2.4 Інформаційна модель структури синтезованих компонент БСУЕП	75
2.5 Вдосконалення методу та засобів обміну і збереження технологічних	



даних	76
2.6 Синтез інтелектуальних компонентів багаторівневих систем управління енергоефективністю підприємства	82
2.7 Висновки до розділу 2	88
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ ПІДПРИЄМСТВА	90
3.1 Розроблення базової архітектури багаторівневої системи управління енергоефективністю технологічних процесів	90
3.2 Розробка алгоритмів функціонування багаторівневої системи управління енергоефективністю технологічних процесів підприємства	99
3.3 Розробка моделей аналізу динаміки функціонування системи управління енергоефективністю технологічних процесів на підприємстві	106
3.4 Висновки до розділу 3	114
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ЗАСОБІВ ЗБОРУ ТА ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ ПІДПРИЄМСТВА	117
4.1 Розроблення структури інформаційної технології збору та опрацювання даних для системи управління енергоефективністю підприємства	117
4.2 Розроблення засобів системи синтезу мікроконтролерних засобів збору та опрацювання даних	117
4.3 Розроблення інформаційного забезпечення системи синтезу елементів системи управління енергоефективністю регіону	122
4.4 Розроблення засобів зменшення потужності множини альтернативних рішень	124
4.4.1 Підсистема зменшення потужності множини альтернативних рішень на базі побудови множини ефективних рішень Парето	124
4.4.2 Підсистема зменшення потужності множини альтернативних рішень на базі згорток	130
4.5 Розробка нейроконтролера попереднього опрацювання даних	131
4.5.1 Розроблення структури інтелектуального засобу збору та опрацювання даних	132

4.5.2 Побудова моделей сценаріїв функціонування інтелектуального засобу збору та опрацювання даних	133
4.5.3 Підготовка даних для навчання та тестування нейромережі	134
4.5.4 Реалізація та навчання штучної нейронної мережі	135
4.6 Програмно-апаратна реалізація базового нейроконтролера	137
4.6.1 Особливості апаратної реалізації нейроконтролера	137
4.6.2 Програмна реалізація нейроконтролера	138
4.7 Результати автоматизованого синтезу засобу збору та опрацювання даних на базі мікроконтролера для системи управління енергоефективністю підприємства	140
4.8 Дослідження ефективності розв'язання задач структурного синтезу засобів збору та опрацювання даних	149
4.9 Висновки до розділу 4	155
ВИСНОВКИ	157
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	159
ДОДАТКИ	176
Додаток А. Блок-схема алгоритму роботи першого рівня БСУЕП	176
Додаток А1. Блок-схема алгоритму роботи другого рівня БСУЕП	177
Додаток А2. Блок-схема алгоритму роботи третього рівня БСУЕП	178
Додаток Б. Граф досяжності станів БСУЕП	179
Додаток Б1. Результати дослідження у формі графа досяжності станів проектованої системи	180
Додаток В. Блок-схема алгоритму роботи системи синтезу	181
Додаток В1. Діаграма класів моделей даних програмного забезпечення	182
Додаток В2. Діаграма класів джерел даних програмного забезпечення	182
Додаток В3. Діаграма класів обчислювального ядра	183
Додаток Д. Структура таблиці “Мікроконтролери”	184
Додаток Д1. Структура таблиці “Давачі”	185
Додаток Д2. Структура таблиці “Актюатори”	186
Додаток Д3. Структура таблиці “Плати розширення”	187

Додаток Е. Блок-схема алгоритму роботи підсистеми розв'язання ЗБО з використанням адитивної, мультиплікативної та максимінної і мінімаксної згорток	188
Додаток Є. Структура програми нейромережі	189
Додаток Є1. Приклад коду основного класу для нормалізація даних	189
Додаток Є2. Фрагмент вхідних даних для навчання нейромережі	190
Додаток Є3. Результати навчання нейромережі ітерації 1-2000	191
Додаток Є4. Результати навчання нейромережі ітерації 2001-6000	191
Додаток Є5. Набір даних для перевірки нейромережі	192
Додаток Є6. Вихідні результати перевірки навчання нейромережі	192
Додаток Є7. Загальний алгоритм роботи нейроконтролера	193
Додаток Є8. Блок-схема алгоритму роботи підпрограми для симуляції роботи нейромережі	194
Додаток Ж. Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження	195
Додаток Ж1 Список публікацій здобувача за темою дисертації	197

### ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CoDeSys	– Controllers Development System
CPS	– кіберфізичні системи
DCS	– Distributed Control System – розподілена система керування
ERP	– система планування ресурсів підприємства
FBD	– Function Block Diagram – мова функціонально-блокових діаграм
HMI	– системи для організації інтерфейсу людини – машини
IL	– Instruction List – мова інструкцій
IoT	– “інтернет речей”
LD	– Ladder Diagrams – мова релейно-контактних схем
MES / MOMS	– системи управління виробничими операціями
SBC	– одноплатний комп’ютер
SCADA	– Supervisory Control And Data Acquisition – програмне забезпечення для контролю та збору даних
SFC	– Sequential Function Chart – мова послідовних функціональних діаграм
SoC	– системи на кристалі
ST	– Structured Text – мова структурованого тексту
БПП	– багатопортова пам’ять
ВВП	– валовий внутрішній продукт
ВМ	– виконавчий механізм
ІТ	– інформаційні технології
МЗОЗД	– модуль збору, обміну та збереження даних
МК	– мікроконтролер
МППП	– модель послідовних геометричних перетворень
НВІС	– надвеликі інтегральні схеми
ОК	– одноплатні комп’ютери
ПК	– персональний комп’ютер
ПЛІС	– програмовані логічні інтегральні схеми
ПЛК	– програмований логічний контролер
СУЕТПП	– системи управління технологічними процесами

## ВСТУП

Розвиток економіки України тісно пов'язаний з підвищенням її енергоефективності, яка залежить від збалансованого і ощадливого споживання енергетичних ресурсів; використовуваних технологій, обладнання та схем енергопостачання; структури споживання паливно-енергетичних ресурсів; рівня управління енергоефективністю і споживанням енергоресурсів. Для оцінювання енергоефективності економіки країни використовують низку показників, зокрема, валовий внутрішній продукт (ВВП), що характеризує рівень витрат паливно-енергетичних ресурсів на одиницю виробленого валового внутрішнього продукту. Енергоємність ВВП в Україні більше, ніж у два рази перевищує енергоємність ВВП економічно розвинених європейських країн, що унеможлиблює досягнення високих темпів економічного зростання та підвищення добробуту громадян.

Підвищення енергоефективності економіки є комплексною проблемою, вирішення якої передбачає розроблення та реалізацію низки системних рішень, як на рівні країни, регіону, так і на рівні окремих підприємств. Важливим інструментом підвищення енергоефективності підприємств є розроблення багаторівневої системи управління енергоефективністю підприємства (БСУЕП). Основними задачами БСУЕП є: збір, зберігання і опрацювання даних у реальному часі про технологічний процес, енергоспоживання та випуск продукції. Використовуючи результати опрацювання такої інформації, у БСУЕП виконується оцінювання показників енергоефективності та формуються управлінські рішення з метою підвищення енергоефективності. Основними вимогами, які висувають до засобів збору, зберігання і опрацювання даних є: наближення їх до дачив, виконавчих механізмів і лічильників обліку енергоспоживання; інтелектуалізація процесу опрацювання та прийняття управлінських рішень; виконання обмежень щодо габаритів, енергоспоживання, вартості та часу розробки.

Створення таких засобів вимагає розроблення і вдосконалення існуючих методів збору, зберігання та опрацювання даних і їх орієнтацію на широке

використання сучасної елементної бази. Крім того, вимагається розроблення методів синтезу засобів збору, зберігання та опрацювання даних і моделей динамічного аналізу їх функціонування в БСУЕП.

Значний внесок в теорію та практику дослідження енергоефективності підприємств внесли: В. Л. Ганжа – розроблені основні принципи енергетичного менеджменту; Дж. Нільсон та А. Мартенсон – регіональне енергопланування та розроблення локальних енергосистем; А. Мастепанов – економіка та енергетика регіонів; Б. Кейпхарт – методи та засоби побудови автоматизованих систем управління енергоефективністю; Мін Янг та Ксін Ю – дослідження проблем управління енергоефективністю на державному рівні та міждержавна співпраця; С. Тіде – застосування систем управління енергоефективністю у виробничій сфері; К. Оунг – вироблення рекомендацій щодо підвищення енергоефективності у виробництві; Б. Сміт – рішення для підвищення енергоефективності в ІТ-сфері; К. Метаксіотіс – інтелектуалізація систем управління енергоефективністю; П. Толандер і Дж. Палм – інженерні рішення для підвищення енергоефективності; Дж. Ху і С.-Ц. Ванга – розроблення узагальненого фактора енергоефективності; Сікора Л.С. – моделі систем управління технологічними процесами; Медиковський М. О. – розроблення моделей та засобів управління енергоефективністю; Ткаченко Р. О. – моделі керування енергоефективністю на основі штучних нейронних мереж.

Таким чином, актуальною науковою задачею є розроблення та вдосконалення моделей, методів і синтез засобів збору та опрацювання даних багаторівневої системи управління енергоефективністю підприємства з високими техніко-економічними характеристиками. Відповідно, тема дисертаційного дослідження “Методи та засоби збору і опрацювання даних в системах управління енергоефективністю підприємства” є актуальною.

#### **Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дослідження, представлені в дисертації, проводилися в рамках держбюджетних НДР Національного університету “Львівська політехніка” «Інтелектуальні інформаційні технології багаторівневого управління

енергоефективністю регіону» (номер державної реєстрації 0117U004450) та «Розроблення базових компонентів для синтезу інтелектуальних мобільних робототехнічних систем» (номер державної реєстрації 0113U003191).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розроблення та вдосконалення моделей, методів і синтез засобів збору та опрацювання даних багаторівневої системи управління енергоефективністю підприємства з високими техніко-економічними характеристиками.

Мета дисертаційної роботи визначила необхідність виконання таких завдань:

- проаналізувати існуючі методи та засоби збору і опрацювання даних в системах управління енергоефективністю підприємства та визначити основні напрямки розроблення апаратно-програмних складових для синтезу систем управління енергоефективністю підприємства;
- розробити моделі на основі теорії мереж Петрі для аналізу процесів в багаторівневих системах управління енергоефективністю підприємства;
- удосконалити метод синтезу засобів збору і опрацювання даних в системах управління енергоефективністю підприємства;
- удосконалити метод обміну даними між ієрархічними рівнями в системах управління енергоефективністю підприємства;
- удосконалити метод реалізації засобів опрацювання даних з використанням нейромереж, на основі паралельного таблично-алгоритмічного обчислення скалярного добутку;
- розробити інструментальні засоби синтезу та реалізувати і дослідити апаратно-програмні пристрої збору і опрацювання даних у БСУЕП.

**Об'єктом дослідження** є процеси збору і опрацювання даних в багаторівневих системах управління енергоефективністю підприємства.

**Предметом дослідження** є моделі, методи і засоби збору і опрацювання даних в багаторівневих системах управління енергоефективністю підприємства.

**Методи досліджень.** Для розв'язання поставлених в дисертаційній роботі задач, використано теорію мереж Петрі та їх розширення для побудови моделей функціонування БСУЕП, теорії розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації для вибору елементної бази, методи нейромережових технологій для синтезу засобів інтелектуального опрацювання даних, теорія проектування апаратно-програмних засобів для синтезу складових інформаційної технології (ІТ), методи об'єктно-орієнтованого підходу в процесі розроблення програмних засобів.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Вперше розроблено моделі динамічного аналізу функціонування засобів збору і опрацювання даних в багаторівневих системах управління енергоефективністю підприємства, які за рахунок використання теорії ієрархічних мереж Петрі, забезпечують прийняття рішення про відповідність функціонування системи згідно з вимогами технічного завдання.

2. Удосконалено метод синтезу засобів збору і опрацювання даних в системах управління енергоефективністю підприємства, який за рахунок врахування інтерфейсів, вимог технічного завдання та використання інтегрального критерію ефективності компонентів, забезпечує синтез засобів систем з високими техніко-економічними показниками.

3. Удосконалено метод безконфліктного обміну даними, який за рахунок узгодження інтенсивності надходження даних з інтенсивністю доступу до засобів обміну, забезпечує визначення мінімальної швидкодії пам'яті для синтезу засобів обміну в реальному часі з високими техніко-економічними показниками.

4. Удосконалено метод обчислення сигналу постсинаптичного збудження нейронних елементів в штучних нейронних мережах, який ґрунтується на паралельному таблично-алгоритмічному обчисленні скалярного добутку з використанням двох і більше таблиць та забезпечує зменшення часу опрацювання даних.

**Практичне значення одержаних результатів.**



Розроблено структуру, програмне та інформаційне забезпечення системи синтезу засобів ІТ збору і опрацювання даних в системах управління енергоефективністю підприємства.

Розроблено алгоритми застосування методів та моделей для ІТ збору і опрацювання даних в БСУЕП. Використання методу вибору елементної бази та синтезу базових апаратно-програмних компонентів забезпечує зменшення часу їх розроблення та підвищує ефективність використання обладнання.

Розроблено трирівневу базову архітектуру БСУЕП із змінним складом обладнання, яка має постійне ядро та змінні модулі, за допомогою яких забезпечується адаптація системи до вимог конкретного підприємства. Використання розробленої моделі архітектури БСУЕП, яка ґрунтується на теорії простих, кольорових та ієрархічних мереж Петрі, забезпечує дослідження динаміки функціонування системи, визначення надлишковості структури, зациклень та тупикових станів.

Розроблено пристрій збереження та обміну в БСУЕП з промисловою мережею, в якому завдяки використанню методу часового розподілу ресурсів пам'яті, забезпечено безконфліктний обмін даними у реальному часі та збільшено множину зовнішніх пристроїв, що реалізують режим звертання багатьох до багатьох.

Розроблено структуру та алгоритм функціонування інтелектуальної БСУЕП для тепличного вирощування рослин. Побудовано структуру, алгоритм функціонування, програмне та технічне забезпечення базової інтелектуальної складової для збору та опрацювання даних, яка ґрунтується на використанні штучних нейронних мереж з використанням, в процесі її програмно-апаратної реалізації, паралельного таблично-алгоритмічного обчислення скалярного добутку з використанням двох і більше таблиць (Заявка на видачу патенту № а201711461 від 23.11.2017 р.), що дає змогу опрацьовувати дані в режимі реального часу та розпаралелити процес опрацювання технологічних даних.

Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи використовуються при розробленні перспективних радіоелектронних систем,

які працюють в режимі реального часу в Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України та впроваджені у навчальний процес кафедри автоматизованих систем управління Національного університету “Львівська політехніка”. Впровадження матеріалів досліджень підтверджено відповідними актами.

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові результати теоретичних і практичних досліджень, викладених у дисертації, одержано автором особисто. Праця [11] опублікована одноосібно. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: програмне забезпечення, результати та метод синтезу засобів збору і опрацювання даних в БСУЕП з використанням інтерфейсів [1]; архітектура та алгоритми роботи БСУЕП [2, 6, 9, 16]; моделі на основі простих, кольорових та ієрархічних мереж Петрі, програмне забезпечення і результати дослідження [2, 10, 11]; метод безконфліктного обміну даними та пристрій збереження та обміну даними між складовими багаторівневої системи [3, 18]; метод реалізації засобів опрацювання даних з використанням нейромереж, який ґрунтується на паралельному таблично-алгоритмічному обчисленні скалярного добутку [5, 27]; інформаційна модель та база даних системи автоматизації структурного синтезу з використанням морфологічного методу [8]; метод вибору комплектуючих засобів ІТ БСУЕП [1, 8, 19]; модель та програмне забезпечення інтелектуальної складової БСУЕП [7]; структура, програмне та інформаційне забезпечення системи розв’язання задач багатокритеріальної оптимізації з використанням побудови множини оптимальних рішень – Парето [13]; структура та програмне забезпечення нейроконтролера [15, 24]; модель та структура інтелектуального засобу системи [17]; моделі на основі мереж Петрі та програмне забезпечення [20, 21]; фізична модель управління робототехнічною системою [22]; алгоритм та програмне забезпечення [23]; структура, модель на основі штучних нейронних мереж та програмне забезпечення [25]; структура, програмне та інформаційне забезпечення системи синтезу мікроконтролерних пристроїв [26].

**Апробація роботи.** Основні теоретичні положення та практичні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: Міжнародній науково-технічній конференції “Перспективні технології і методи проектування MEMC” (“Perspective Technologies and Methods in MEMS Design”), MEMSTECH, (Поляна – Свалява (Закарпаття), 2013, 2015, 2018); Міжнародній конференції “Досвід розробки і застосування САПР в мікроелектроніці” (The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics), CADSM (Поляна – Свалява (Закарпаття), 2013, 2017); Міжнародній науково-технічній конференції “Комп’ютерні науки та інформаційні технології” (“Computer Sciences and Information Technologies”), CSIT, (Львів, 2012, 2017), Міжнародній науково-технічній конференції “Data Stream Mining & Processing”, DSMP, (Львів, 2016, 2018), VIII-ій Українсько-польській науково-практичній конференції “Електроніка та інформаційні технології” (ЕЛІТ-2017), (Львів-Чинадієво, 2017), а також на наукових семінарах кафедри автоматизованих систем управління Національного університету “Львівська політехніка” (2016-2018).

**Публікації.** За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 27 друкованих праць, серед них 1 стаття одноосібна та 4 статті у наукових періодичних виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus та 11 статей у фахових виданнях України, 5 з яких входять до міжнародних наукометричних баз Inspec, Index Copernicus, та 11 публікацій у матеріалах конференцій, 8 з яких входять до міжнародної наукометричної бази Scopus та Web of Science.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 200 сторінок, у тому числі 158 сторінок основного тексту, 36 рисунків та 6 таблиць, список використаної літератури налічує 160 бібліографічних найменувань. Дисертація містить 7 додатків, розміщених на 25 сторінках.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ ПІДПРИЄМСТВА

### 1.1 Аналіз особливостей технологій Індустрії 4.0

Сучасний світ стоїть на порозі нової технологічної революції [1] в промисловості – внаслідок об'єднання матеріального світу промислового виробництва з сферою інформаційно-комунікаційних технологій [2], робототехніки [3, 4, 5, 6] та штучного інтелекту [7]. Впровадження новітніх інтегрованих інформаційних ресурсів у фізичні процеси виробництва – зумовило утворення кіберфізичних систем (CPS) [8] – саморегульованих систем автоматизованого виробництва, технологічний процес відбувається без участі людини, обміну даними між окремими підрозділами підприємств і корпорацій та можливостями здійснювати вплив на фізичні процеси.

Інформаційні технології застосовують в різних сферах промисловості для автоматизації різних процесів вже досить давно. Таке використання новітніх науково-технічних досягнень, в основному, відбувалося шляхом нарощування потужностей агрегатів, технологічних ліній чи зростання продуктивності праці – екстенсивного економічного зростання. Оптимізація автоматизованих процесів – зумовила зміни в організації виробництв для більш ефективного використання ресурсів [9] і інтенсивне економічне зростання.

Тепер настав час об'єднати окремі галузі промисловості, що ґрунтуються на використанні електронних та інформаційних систем, в глобальну мережу Інтернету речей [10], даних і послуг. “Розумні” заводи (Smart Factory) [11, 12], виробництво на яких повністю автоматизоване, всі технологічні процеси управляються комп'ютерними системами, контролювати чи вносити зміни на яких можна в режимі реального часу – вже давно є реальністю. Саме такі “розумні” виробництва – стали основою “Industry 4.0” (“Індустрії 4.0”) [13, 14, 15].

Термін “Industry 4.0” був вперше вжитий в 2011 році на одній з промислових ярмарок в Ганновері, а у жовтні 2012 року, урядом Німеччини, була представлена стратегія розвитку національної економіки – комплекс заходів переведення виробництва країни у “розумні” виробництва та створення загальнонаціональної системи для ефективного використання ресурсів та утримання лідерства Німеччини в системі світової економіки. За прикладом Німеччини, подібні стратегії розробили також уряди інших країн для своїх національних економік.

Хоча, термін “Industry 4.0”, на самих початках, стосувався промисловості і технологій у виробництві, зараз він є синонімом “четвертої промислової революції” [16], що визначає напрям досліджень та інновацій у сфері використання віртуальних технологій у матеріальному світі, а також новий етап розвитку суспільства. Термін “революція” – вживається тому, що використання систем штучного інтелекту, кіберфізичних систем, поєднання різних технологій – призвело до зміни бізнес-моделей. За останні кілька років відбулися також зміни у рейтингах найбагатших компаній – на зміну лідерству компаній, що видобувають корисні копалини та енергоресурси, найбагатшими стали компанії, що спеціалізуються на ІТ-технологіях.

Всі компанії, що прагнуть бути лідерами ринку і можуть впровадити головні принципи Індустрії 4.0 [17] на своїх підприємствах – мають відповідати певним вимогам, а саме:

- зв'язок, обмін інформацією та взаємодія між пристроями, машинами і механізмами та людьми, що управляють ними через використання технології “інтернет речей” (IoT). Сучасний стан технологій дає можливість створювати віртуальні дуже точні копії об'єктів та накопичувати і аналізувати величезний масив інформації – дані, що надходять від сенсорів і давачів про процеси виробництва в цілому, завантаженість обладнання та запаси ресурсів;

- відкритість, доступність зібраних даних про виробництво в будь який момент часу та можливість вносити зміни і коректування – забезпечують принцип прозорості;

- принцип технічної підтримки – всі сучасні вдосконалення управління технологічними процесами, збір і аналіз інформації, управління автоматизованими системами необхідні для ефективного управління виробництвом;

- максимально, наскільки це можливо, замінити участь людини в промисловому процесі машинами, роботизованими системами і комп'ютерами, водночас людина має можливість контролювати технологічний процес, управляти, за потреби вносити корективи в будь який момент часу чи реагувати на екстрені та нестандартні ситуації.

Використання принципів “Industry 4.0” повністю переформатує галузі економіки: від неефективного, неоптимального виробництва і «ручного» управління процесами внаслідок відсутності достатньої інформації до сконсолідованої і взаємопов'язаної єдиної системи «розумного» управління попитом і витратами та моніторинг стану всіх підприємств країни.

Україна має всі передумови та науковий потенціал і повинна стати одною з країн, що впроваджують “Industry 4.0”, адже основою “Industry 4.0” є інформаційні засоби та технології.

Однією з пріоритетних галузей економіки України – є енергетична галузь, а проблеми енергоефективності – запорука економічної незалежності країни. До того ж – Україна має об'єднану енергетичну систему: всі виробники електричної енергії, всі споживачі від маленьких домогосподарств до величезних промислових підприємств і комплексів об'єднані між собою мережею ліній електропередач.

Сучасний стан української енергетичної системи це одночасно:

- підтримка існуючої інфраструктури нафтогазової і вугільної промисловості в сучасних умовах потребує більше капітальних вкладень, ніж прибуток від їхньої роботи;

- необхідно диверсифікувати постачання ядерного палива, нафтогазових та вугільних енергоресурсів в умовах дефіциту і світових цін на ці ресурси;

- монополізація електромереж і виробників електроенергії та державне регулювання цін для населення та промислових підприємств, що зумовлює зростання соціально-політичної напруженості та знижує рентабельність енергетичної галузі [18].

Проведений аналіз сучасних підходів до організації виробництва, дає змогу стверджувати, що подальший розвиток енергетичного сектору України неможливий без впровадження технології “Industry 4.0”.

## 1.2 Аналіз архітектур систем управління енергоефективністю підприємства

Для успішної роботи підприємства необхідно враховувати багато факторів та мати можливість контролювати систему, аналізувати її роботу та приймати ефективні рішення [19]. Для досягнення даної мети необхідно використовувати інфраструктуру [20], яка дає змогу враховувати бізнес процеси, виробничі цикли та отримувати інформацію про стан системи у реальному часі.

Проведений аналіз дає змогу стверджувати, що ключовими елементами системи управління на підприємстві є планування ресурсів підприємства [21], ланцюги постачання [22], системи відслідковування стану середовища, системи безпеки, ресурси та персонал підприємства.

Для розгортання підприємств використовують різноманітні готові (базові) модулі, кожен із яких орієнтований на розв’язання спеціалізованих задач. Дані модулі надходять від різних постачальників і різняться як за архітектурою, так і за інтерфейсами роботи. Такий підхід надає змогу розвивати підприємство за рахунок використання додаткових модулів, які приєднуються до вже існуючої системи.

В результаті, система управління підприємством складається з багатьох модулів, які сформовані у єдину систему. Стратегія управління всією системою підприємства ґрунтується на інтеграції бізнес-логіки системи та

виробництва в режимі реального часу. Система управління підприємством охоплює все, починаючи від датчиків і закінчуючи операторами, які приймають рішення.

На сьогоднішній момент розроблені декілька стандартів для побудови, розгортання та аналізу систем управління на підприємствах. До них належать популярні стандарти ANSI/ISA-95 [23, 24, 25] та IEC 62264-1 [26, 27]. Стандарт IEC 62264 базується на стандарті ISA-95.

Стандарт ANSI ISA-95 розроблений в США організацією ISA Committee of volunteer experts. ANSI ISA-95 є міжнародним стандартом для розроблення автоматизованого інтерфейсу між підприємствами та системами управління. Він був розроблений для застосування в усіх галузях промисловості, а також у всіх різновидах процесів, таких як періодичні процеси, безперервні та повторювані процеси.

Стандарт ANSI ISA-95: “Інтеграції системи управління підприємством” активно розробляється та включає у себе наступні частини:

- ANSI/ISA 95.01-2000 Частина 1: “Моделі та термінологія”;
- ANSI-ISA 95.02-2001 Частина 2: “Атрибути об'єктів”;
- ANSI/ISA 95.03-2005 Частина 3: “Моделі виробничих операцій”;
- ANSI/ISA 95.05-2007 “Частина 5: Бізнес-процеси виробництва”.

В основі стандартів інтеграції системи управління підприємством є вирішення проблем із інтеграцією бізнес логіки та виробничих процесів, організації процесів контролю та виробництва, інтеграцію модулів систем тощо. Основними областями дослідження є моделі обміну інформацією між системами бізнес-логістики та виробничими операціями, моделі діяльності в системах виробничих операцій, моделі обміну інформацією в системах виробничих операцій.

Згідно із стандартом системи управління підприємством є розбита на рівні, кожен із яких відрізняється за основними функціями та складовими.



Рівень 0 – рівень фізичних процесів. На даному рівні описуються фізичні процеси, які відбуваються на виробництві.

Рівень 1 – рівень інтелектуальних пристроїв. На цьому рівні описуються операції пов'язані з відстеженням та маніпулюванням фізичними процесами. Також на даному рівні опрацьовують дані від датчиків, аналізаторів, виконавчих елементів та інших допоміжних пристроїв.

Рівень 2 – Системи управління. На даному рівні описуються функції моніторингу та контролю фізичних процесів. Даний рівень включає у себе програмне забезпечення для управління в режимі реального часу; системи для організації інтерфейсу людини – машини (HMI); програмне забезпечення для контролю та збору даних (SCADA).

Рівень 3 – Системи виробничих операцій. На даному рівні описуються робочі процеси, які необхідні для вироблення вихідної продукції. Рівень включає у себе: управління пакетами; системи управління виробничими операціями (MES / MOMS); лабораторії, системи технічного обслуговування та експлуатації установок; бази даних для збереження історичних даних про стан системи.

Рівень 4 – Системи бізнес-логістики. На даному рівні описуються дії необхідні для управління виробничою організацією. Рівень включає у себе основну систему планування ресурсів підприємства (англ. Enterprise Resource Planning System - ERP); основні графіки та перелік робіт на підприємстві, тощо.

Архітектуру системи управління підприємством з погляду планування та управління можна умовно розділити на 3 основні рівні, які включають:

На рівні “Бізнес-планування & Логістика” відбувається планування виробництва, управління бізнесом тощо. Даний рівень охоплює 4-ий рівень архітектури. Часові рамки дії команд на даному рівні є порядку місяців, тижнів або днів.

На рівні “Управління виробничими операціями” відбувається контроль, детальне планування виробництва, відслідковування надійності, тощо. Даний

рівень охоплює 3-ий рівень архітектури. Часові рамки дії команд на даному рівні є порядку годин, хвилин або секунд.

На рівні “Виробничого контролю” відбувається основний контроль за роботою технологічних процесів, аналіз та управління процесами. Даний рівень охоплює 1-ий та 2-ий рівні архітектури. Часові рамки дії команд на даному рівні є порядку секунд або мілісекунд.

Важливим елементом ANSI ISA-95 є опис підходів до обміну даними між рівнями. Згідно із стандартом запропоновано моделі даних для відображення обміну даних між рівнями. Моделі зазвичай описуються за допомогою мов UML [28] та XML [29]. Кожен із рівнів здатний комунікувати із сусідніми рівнями та накопичувати інформацію необхідну для функціонування системи. Для прикладу, система може передавати дані про топологію системи, стан середовища, актюаторів, технологічних процесів. Система здатна відслідковувати залучені ресурси, перелік виробленої продукції, параметри якості продукції, плани випуску продукції, планів по виробленню тощо. Система агрегує велику кількість даних у реальному часі стосовно роботи підприємства. Система містить додаткові модулі, які здатні аналізувати великі обсяги даних та відображати їх у зрозумілому форматі для користувача. Саме тому оператори здатні проаналізувати інформацію про роботу підприємства та приймати якісні управлінські рішення.

Застосування стандарту ANSI ISA-95 дає змогу зменшити час для інтеграції системи управління на підприємстві, підвищити успішність завершення інтеграції системи, зменшити витрати на розгортання системи, оскільки використовують стандартні формати та програмні модулі.

Сучасні інформаційні інтелектуальні технології та системи все більше використовуються в управлінні шляхом створення ефективного середовища для управління технологічними процесами та виконання бізнес процесів (управління фінансовою, господарською, адміністративною та виробничою діяльністю) як на підприємстві, так і в регіоні. Інформаційна інтелектуальна система поступово перетворюється із зручного інструмента збору, збереження

та опрацювання даних у інструмент для підтримки прийняття управлінських рішень на всіх рівнях управління. Керівники, що використовують такі системи, концентруються не на задачах інтеграції та опрацювання даних, а на формуванні управлінських рішень. Вони отримують можливість зосередитися на задачах управління енергоефективністю та значною мірою абстрагуються від інформаційних технологій.

Проведений аналіз дає змогу стверджувати [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36], що базова структура системи управління енергоефективністю підприємства складається з трьох рівнів: збору даних та управління виконавчими механізмами; контролю та управління технологічними процесами; операторського контролю та формування управлінських рішень.

Специфіка кожного рівня системи управління енергоефективністю підприємства визначається апаратно-програмними компонентами [37]. На кожному ієрархічному рівні управління необхідно розв'язувати задачі відповідного рівня складності.

На рівні збору даних та управління виконавчими механізмами для попереднього опрацювання даних від датчиків в умовах завод і неповної інформації використовуються мікроконтролери сімейства STM8 та STM32 [38].

На рівні контролю та управління технологічним процесом використовуються мікроконтролерні системи RaspberryPi та Arduino [39, 40], програмовані логічні контролери Mitsubishi Melsec FX3U [41], засоби візуального контролю та управління технологічним процесом.

Рівень операторського контролю та формування управлінських рішень. На цьому рівні операторський контроль представлений автоматизованим робочим місцем оператора. Апаратні засоби, які можуть використовуватися на цьому рівні, визначається інтенсивністю надходження даних, складністю алгоритмів опрацювання та вимогами за надійністю, які висуваються до системи управління. В якості апаратних засобів можуть використовуватися робочі станції оператора на RISC- або Intel-платформах [42]. Для розв'язання таких задач використовується системи SCADA [43], основною функцією якої є

створення інтерфейсу оператора та збір даних про технологічний процес. Для контролю та управління технологічним процесом використовується інструментальне забезпечення, яке є сукупністю апаратних засобів, каналів зв'язку та алгоритмічно-програмних засобів.

### 1.3 Підходи до синтезу складових багаторівневих систем управління енергоефективністю підприємства

На сучасному етапі розвитку інформаційних технологій розробка складових БСУЕП зводиться до задачі їх синтезу на базі існуючих готових апаратних і програмних засобів [44, 45], оскільки розроблення та виготовлення нових вимагає значних коштів і часу. При синтезі складових БСУЕП необхідно враховувати множину факторів, а саме: інформацію про готові апаратно-програмні засоби, їх технічні характеристики, відповідність інтерфейсів стандартам, можливості їх покупки та інше.

Пропонується розробку високоефективних компонентів БСУЕП здійснювати на основі комплексного підходу, який ґрунтується на можливостях сучасної елементної бази та охоплює методи та алгоритми опрацювання технологічних даних, архітектури компонентів, враховує вимоги конкретних застосувань та інтенсивності надходження даних.

В основу проектування сучасних БСУЕП доцільно покласти системну інтеграцію, яка охоплює всі рівні інтеграції технологічних процесів і інфраструктуру та орієнтована на забезпечення вимог конкретного застосування.

Системну інтеграцію пропонується здійснювати на основі модульно-орієнтованої технології, яка передбачає поділ процесу розробки на ієрархічні рівні. Для реалізації даної технології використовується метод декомпозиції, що передбачає розбиття багаторівневих систем управління на рівні та апаратно-програмні модулі. На кожному рівні ієрархії використовуються апаратно-програмні модулі для розв'язання задач відповідної складності, що

характеризуються як одиницями інформації, так і алгоритмами опрацювання. Збільшенню номера рівня ієрархії відповідає збільшення деталізації апаратних і програмних модулів. При цьому, на вищих рівнях ієрархії одиниці інформації, алгоритми, програмні та апаратні засоби представляють собою впорядковані сукупності одиниць інформації та композиції алгоритмів, програмних і апаратних засобів нижчих рівнів ієрархії. Методологія послідовної декомпозиції, яка використовується при розробці БСУЕП, відображає процес розробки “зверху вниз”.

При синтезі БСУЕП доцільно використовувати як горизонтальну, так і вертикальну інтеграцію. Горизонтальна інтеграція передбачає об'єднання модулів на одному рівні ієрархії, а вертикальна – об'єднує модулі сусідніх рівнів ієрархії.

Підходи до розроблення складових БСУЕП. При розробленні компонентів БСУЕП доцільно використовувати такі підходи:

- перший - на основі використання універсальних обчислюваних засобів (комп'ютерів, мікропроцесорів і мікроконтролерів) шляхом розробки спеціалізованого програмного забезпечення;
- другий - з використанням спеціалізованих засобів (ПЛІС), які апаратно реалізують алгоритми роботи складових БСУЕП;
- третій - з використанням функціонально-орієнтованих засобів (систем на кристалі, універсальних обчислювальних засобів доповнених апаратними розширювачами, які реалізують базові алгоритми та складні базові операції).

Перший підхід, який ґрунтується на використанні універсальних обчислюваних засобів для програмної реалізації алгоритмів обробки. Його перевагою є доступність для широкого кола користувачів і можливість використання раніше розроблених програм. Недоліками такого підходу є невисока швидкодія, функціональна і структурна надлишковість обчислювальних засобів. Розроблені складові БСУЕП на базі універсальних обчислюваних засобів орієнтовані на опрацювання за простими алгоритмами потоків даних з невисокою інтенсивністю надходження.

Другий підхід орієнтований на розроблення спеціалізованих апаратних модулів БСУЕП, які забезпечують опрацювання інтенсивних потоків даних за складними алгоритмами у реальному часі. При цьому висока ефективність використання обладнання, в таких спеціалізованих апаратних складових досягається шляхом узгодженням їх обчислювальної здатності з інтенсивністю надходження потоків даних:

$$D_k = P_d, \quad \frac{m_o n_o}{T_k} = F_d k n_k, \quad (1.1)$$

де  $m_o$  – кількість трактів опрацювання,  $n_o$  – розрядність трактів опрацювання,  $T_k$  – тривалість такту опрацювання.

Використання для реалізації складових БСУЕП ПЛІС, з динамічним репрограмуванням, відкриває новий етап розроблення реконфігурованих модулів, особливістю яких є архітектурна гнучкість, яка в рівній степені стосується як апаратних (hardware), так і програмних (software) засобів. В таких модулях структура може динамічно змінюватися, що робить їх універсальнішими. Реалізація модулів на базі реконфігурованих структур забезпечує нарощування функцій та їх адаптацію до вимог конкретних застосувань.

Третій підхід з використанням функціонально-орієнтованих засобів є перспективним, оскільки він передбачає поєднання універсальних програмних і спеціалізованих апаратних засобів. Таке поєднання забезпечує високу ефективність використання обладнання при розробленні модулів для опрацювання у реальному часі інтенсивних потоків даних за алгоритмами, які є нерегулярними з великою кількістю логічних операцій. При цьому розробка складових БСУЕП зводиться до доповнення універсальних обчислюваних засобів, які програмно реалізують алгоритми опрацювання та управління з великою кількістю логічних операцій, спеціалізованими апаратними засобами, які реалізують складні обчислювальні алгоритми та макрооперації. При реалізації складових БСУЕП з використанням третього підходу доцільно використовувати системи на кристалі SoC та core-технологію.

#### 1.4 Давачі та актюатори систем управління енергоефективністю підприємства

Існуючі засоби збору даних використовують в технічних системах, які вимірюють фізичні параметри технологічних процесів, передають сигнали, регулюють та керують приладами і процесами. Принцип дії давачів – перетворюють значення фізичних параметрів (тиск, температура, витрата, концентрація, частота, швидкість, переміщення, електрична напруга, електричний струм тощо), які контролюють – у сигнал (електричний, оптичний, пневматичний) в залежності від призначення пристрою (для вимірювання, передавання, перетворення, зберігання та реєстрації інформації про стан об'єкта вимірювання), що приймає цей сигнал [46].

Сучасний технічний розвиток та вдосконалення – створили якісно нові пристрої – “багатофункціональний давач” чи “інтелектуальний давач” [47]. В цих пристроях, до початкових функцій вимірювання-перетворення-передачу сигналу, додалися можливості аналого-цифрових перетворювачів з мікроконтролерами, які розширили їхні можливості, а саме: сигнали можна попередньо опрацьовувати (лінеаризація, фільтрування, корекція похибок тощо); самодіагностика пристроїв; можливість дистанційно переналаштувати конфігурації пристрою (діапазон вимірювання, одиниці вимірювання, частотні характеристики; присутні компоненти управління; обмін та передавання даних з використанням спеціальних протоколів промислових мереж.

У випадку БСУЕП — важливими параметрами можуть виступати дані про електроспоживання, споживання води, теплові лічильники, температура і вологість у різних точках технологічного процесу. Для відслідковування стану технологічного процесу, залежно від характеру процесу важливим є відслідковування додаткових параметрів таких як тиск, частота, концентрація вмісту речовин, освітленість та інші. Для реалізації цих операцій використовують промислові давачі.

Проведений аналіз існуючих індустриальних давачів температури [48] дає можливість стверджувати, що існують 4-ри основні групи давачів, які використовують різні принципи роботи: резистивний давач температури, термопара, термістор та давач температури на основі технологій інтегральних схем (ІС). В основі методів вимірювання знаходяться залежність опору, напруги РN переходів, термоелектричний ефект при зміні температури оточуючого середовища. На даний момент активно розвивається напрямок ІС давачів температури, оскільки вони ґрунтуються на технологіях інтегральних схемах, відповідно, їх розмір невпинно зменшується. Особливістю ІС давачів температури є те, що вони володіють одночасно хорошими показниками лінійності, точності, чутливості та мають мале споживання енергії. Одним із представників даних давачів є Texas Instruments' LMT70. Давач здатний працювати в температурному діапазоні від  $-55$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ . Точність вимірювання – у межах  $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ , яка залежить від температурного діапазону, розміри давача не перевищують  $0.9\text{мм}$  на  $0.9\text{мм}$ .

Існує багато виробників давачів та іншого допоміжного обладнання для промислових підприємств. Для прикладу компанії як Schneider-electric [49] та Omron виробляють широкий спектр обладнання для збору та аналізу даних про роботу технологічних процесів.

Для дослідження енергоефективності виробництва використовують давачі вимірювання електроспоживання. Такі давачі електроспоживання відслідковують показники напруги, струму та містять внутрішній таймер. За допомогою цих даних обчислюється споживання електроенергії у часі. Для прикладу, компанія Omron розробила давача КМ1, який здатний одночасно вимірювати споживання до 4 ліній із загальною потужністю до  $480\text{кВт}$ . Давач містить вбудований таймер та надсилає виміри про поточну напругу і силу струму.

В процесі вимірювання споживання рідин використовуються давачі, які базуються на вимірюванні завихрень, сили Коріоліса, електромагнітної зміни та інших принципів. Одним із доступних давачів є CFS25 Coriolis розроблений



компанією Schneider-electric, який здатний вимірювати масу, густину та температуру пройденого потоку рідини. Давач випускається у різних варіантах залежно від розміру підвідних труб.

Давачі для визначення параметрів теплового споживання ґрунтуються на обчисленні температури та потоку рідини/повітря, яке було використане для обігріву приміщення або інших об'єктів у технологічній зоні. Задля вимірювання даних характеристик можливо використовувати спеціалізовані комплексні давачі. Відповідно, вище описаний давач CFS25 Coriolis можливо використовувати для обчислення теплового споживання, оскільки у ньому вже є вбудований давач температури.

Складові системи, які відповідають за управління елементами системи та зміну їхніх властивостей (переміщення, зміну освітлення, тиску, температури тощо), з метою зміни стану навколишнього середовища.

Для роботи актюатора необхідний керуючий сигнал та джерело енергії. Керуючий сигнал є не завжди високоенергетичний і може бути переданий у формі електричної напруги або струму, пневматичним або гідравлічним тиском тощо. Головним джерелом енергії може бути електричний струм, тиск гідравлічної рідини або пневматичний тиск. Коли актюатор отримує керуючий сигнал, виконавчий механізм реагує і перетворює енергію у механічний рух, оптоелектричний сигнал, пневматичний сигнал тощо.

Актюатор – це механізм, за допомогою якого система керування діє на навколишнє середовище. Система управління може бути простою (статична механічна або електронна система), керуватися за допомогою програмного забезпечення (для прикладу драйвером принтера, системою управління роботом) або будь-яким іншим вхідним сигналом.

Проведений аналіз індустріальних актюаторів дає змогу стверджувати, що на виробництві широко використовують актюатори для визначення параметрів переміщення, вмикання, налаштування, сигналізації про події тощо. Для управління двигунами використовуються драйвери двигунів, які вмикають двигуни, призначені контролювати частоту обертів, кут повороту тощо. Для

прикладу контролер моторів NX701 розроблений компанією Omron здатний одночасно керувати до 256 ступенями свободи системи. Контролер містить вбудовану пам'ять та здатний виконувати сторонні програми. Одночасно до контролера можна підключити значну кількість пристроїв для одночасного управління системою.

Для вмикання та вимикання різноманітних пристроїв широко використовуються реле, які базуються на електромагнітному принципі. Реле здатні замикати коло при наявності керуючого сигналу. Для вмикання великопотужних пристроїв використовують спеціалізовані реле такі, як МК-S від компанії Omron, який розрахований на 100000 перемикачів та загальну потужність 1750 Вт.

Сигнальні елементи призначені для відображення статусу системи, повідомлення про аварії в системі тощо. В основному, у виробництві, використовуються світлові і звукові сигнали. Для прикладу, компанією Schneider розроблено світловий сигнальний актюатор XVC1B4K, який представляє собою вежу і 4-ох зон виділених окремими кольорами. В якості підсвітки використовуються світлодіодні світильники.

## 1.5 Аналіз засобів опрацювання даних в системі системи управління енергоефективністю підприємства

### 1.5.1 Аналіз сучасних мікроконтролерів

Пристрій, призначений для опрацювання даних від датчиків називається мікроконтролером [50]. Така мікросхема може виконувати прості завдання, а її невеликі розміри – знижує енергоспоживання та зменшує вартість приладів з такими пристроями.

Мікроконтролери широко використовуються у різних сферах для управління вбудованими системами, технологічними процесами, побутовою технікою тощо. Мікроконтролери можуть застосовуватись самостійно як основні елементи управління, так і як елементи складніших систем. Часто

мікроконтролери використовуються для реалізації автоматики та систем збору даних.

Мікроконтролери вперше були розроблені компанією Texas Instrument в 1971. З цього часу багато компаній виробників мікроелектроніки почали активно розробляти системи на базі архітектури i8048 [51], i8051 [52], а згодом ARM [53], RISC [54] та інших. З часом з'являлися цілі сімейства мікроконтролерів і покращувалися їхні характеристики, обсяг пам'яті, тактова частота, перелік доступних команд та периферії.

На даний момент можна відзначити наступні компанії, які активно займаються виробництвом і розробленням мікроконтролерів: Atmel [55], STMicroelectronics [56], Cypress Semiconductor [57], Texas Instruments [58], Microchip [59] та інші. Мікроконтролери даних виробників мають схожі сфери використання але різняться за ціною та потужністю. Також всередині одного виробника виготовляються різноманітні серії мікроконтролерів, які відрізняються за форм фактором, обсягом пам'яті, тактовою частотою, переліком доступних команд та периферії.

Компанія Atmel є дочірньою компанією Microchip та виготовляє 8 бітні AVR, 32 бітні AVR, 32 бітні ARM та 8 бітні мікроконтролери на базі i8051 [52]. У якості малопотужних мікроконтролерів широко використовуються 8 бітні AVR мікроконтролери, які поділяються на 3 родини:

tinyAVR – родина мікроконтролерів, які мають до 16 кб пам'яті під програми, до 1кб оперативної пам'яті та до 512 байт внутрішньої EEPROM пам'яті. Периферія даного сімейства є найбільш обмежена. Дані мікроконтролери використовуються у малопотужних пристроях, які не вимагають складних обчислень та не мають потреби у розширеній пам'яті [60].

MegaAVR – родина мікроконтролерів, які мають до 256 кб пам'яті під програми, до 8кб оперативної пам'яті та до 4кб внутрішньої EEPROM пам'яті. Периферія даного сімейства є розширена та містить додаткові команди. Обсяг пам'яті значно збільшений у порівнянні із tinyAVR [61].

XMEGA – родина мікроконтролерів, які мають до 386 кб пам'яті під

програми, до 32кб оперативної пам'яті та до 4кб внутрішньої EEPROM пам'яті. Периферія даного сімейства є розширена та містить додаткові команди. Обсяг оперативної пам'яті є значно збільшений у порівнянні із MegaAVR [62].

Родина типу AVR використовується у системах, які є не вибагливі до об'єму пам'яті та мають потребу у малому споживанні енергії. У той же час MegaAVR містить значно більше пам'яті та має більш розширену периферію та кількість команд. Родина XMEGA пропонує більший обсяг пам'яті та підвищену продуктивність [63].

32 бітні AVR мікроконтролери розвивалися як продовження 8 бітної архітектури. Дані пристрої були здатні виконувати RISC команди, мали збільшену тактову частоту до 200МГц, та підтримку розширеної периферії як LCD екран, аудіоконтролер, модулі зовнішньої пам'яті та інші. На даний момент проект 32 бітної AVR не розвивається, оскільки було надано перевагу напрямку розвитку мікроконтролерів на базі ARM-M [64].

32 бітні ARM мікроконтролери від компанії Atmel активно розвиваються і використовуються в якості 32 розрядних мікроконтролерів. Atmel надає власні середовища розробки для програмування мікроконтролерів. Також існують безкоштовні аналоги для розроблення і проектування складових комп'ютерних систем [65]. Одним із проектів, який сфокусований для швидкого прототипування та тестування є апаратно обчислювальна платформа Arduino. Платформа побудована на базі мікроконтролерів Atmel та містить елементи вводу/виводу, живлення, програматор та інші допоміжні компоненти, електронна плата з мікроконтролером і виводами входів-виходів. Апаратне та програмне забезпечення є у відкритому і безоплатному доступі для загального користування – не тільки для читання, навчання, а навіть розширювати його можливості як в плані програмного забезпечення, так і з точки зору апаратних засобів. Простий доступ до портів введення/виводу Arduino, дає можливість управляти великою кількістю різних пристроїв як дискретними, так і аналоговими. Даний проект набув великої популярності. Виготовляють різні варіанти реалізації платформ, у яких використовують мікроконтролери ATmega

та ATMEL: AVR – ATmega8, 32u4, 168, 168V, 328, 328P, 328V, 1280 та 2560 (Leonardo, Duemilanove, Mega, Uno, Nano та інші) [66]; ARM - Cortex-M0+, Cortex-M3 (Arduino Due, Arduino Zero, Arduino MKR1000) [67].

Дані платформи мають різноманітні характеристики, які варіюють у межах 16-256 кб флеш пам'яті, 0-8 EEPROM, 0.5-50 SRAM, 14-54 вихідні порти серед яких є як цифрові, так аналогові порти. Платформи різняться у розмірах від 43\*18мм до 102\*53мм. Більші варіанти зазвичай використовуються для прототипування, а готові пристрої будують на зменшених варіантах, як Arduino Nano.

Також для розроблення програм під платформу Arduino надається середовище розробки Arduino IDE. Arduino IDE - це програмне забезпечення для користувачів операційної системи Windows, яке дає можливість писати свої програми (скетчі) для платформи Arduino та складається з редактору коду, компілятора і модуля для завантаження прошивки в мікроконтролер. Середовище розроблення написано на Java і ґрунтується на Processing та іншому програмному забезпеченні з відкритим кодом, що спрощує написання програм навіть початківцям.

У зв'язку із великою популярністю даної платформи серед аматорів, сторонні компанії розробляють різноманітні плати розширення, які спрощують підключення та роботу із сторонніми пристроями, як датчики, актуатори, модулі зв'язку тощо. Також є велика база вже готових бібліотек для роботи із сторонніми компонентами. Тому дана платформа є хорошим вибором для швидкого прототипування систем на основі мікроконтролера.

Однією із найбільш розвинених компаній в виробництві мікроконтролерів є компанія STMicroelectronics. Дана компанія виготовляє мікроконтролери сімейства STM8 та STM32 [38]. Мікроконтролери сімейства STM8 – це відносно нове сімейство мікроконтролерів від компанії ST Microelectronics, в якому втілено мало не все, чого можна очікувати від 8 бітових програмованих контролерів. До переваг контролерів STM8 слід віднести в першу чергу низьку вартість, причому не тільки самого контролера, а і відлагоджувальних плат,

програмувальників та відладчиків. Вбудований bootloader дає можливість завантажувати програми з UART, SPI, CAN, або I2C. Надається безкоштовна бібліотека драйверів периферії. В компанії STM розробили бібліотеку модулів STM8x Firmware Library, яка є фреймворком для мікроконтролерів. Взагалі, у всьому ряді STM8 простежується підвищені вимоги до електромагнітної сумісності та надійності, що також є привабливим для їх використання.

До недоліків слід віднести відсутність контролерів з USB і в маловивідних корпусах (типу SO8). Наразі існує три сімейства STM8:

- STM8S – "*standard*" контролери загального застосування, зазвичай 10 бітна аналогова периферія, середнє за сучасними стандартами енергоспоживання та діапазон живлення - 2.95 - 5.5В [68].

- STM8L – "*low-power*" контролери з низьким споживанням, 12 бітова аналогова периферія, покращена електромагнітна сумісність і діапазон живлення - 1.8-3.6В. У порівнянні зі стандартними контролерами, в цьому сімействі додається деяка кількість периферії, зокрема, DMA [69].

- STM8A – "*automobile*" – сімейство зосереджено на безпеці і надійності, витримують більше навантажень на ніжки, діапазон живлення - 2.95 - 5.5В і працюють при 145 градусах.

STM8 має 8-бітве CISC ядро і містить 6 регістрів: A – *Accumulator* - однобайтний акумулятор, який містить результат виконання будь-якої арифметико-логічної команди; X, Y – *Index* -двохбайтні індексні регістри, які можуть містити відносну адресу комірок пам'яті з якими можна виконувати операції; PC – *Program counter* - трьохбайтний програмний лічильник, який містить абсолютну адресу комірки пам'яті, що містить команду, яка на даний момент виконується; SP – *Stack Pointer* - двохбайтний вказівник верхівки стеку, який має свою пам'ять; CC – *Condition Codes* - однобайтний регістр прапорців (Flags), що містить бітові ознаки результату арифметико-логічної команди, які можна використовувати для розгалужень в програмі.

Мікроконтролер STM8 має 32 вектори переривань, кожен з яких являє собою 4-х байтну (старший байт містить зарезервоване значення 82h) адресу

початку підпрограми-обробника відповідної події, що спричинила переривання. Вихід з обробника переривань здійснюється командою IRET.

У мікроконтролері STM8 частоту тактових імпульсів можна змінювати в процесі роботи, на відміну від AVR, де тактування жорстко прошивається. У застосунках з низьким споживанням це інколи застосовується, при цьому, при збої генератора, контролер перемикається на RC і переходить в режим переривання, в результаті система не залишиться без управління. Пам'ять мікроконтролера умовно розділена на секції по 64К, а кожна секція – на 256 сторінок по 256 байт кожна. Мікроконтролер STM8 дає змогу наступні способи адресації: безпосередню, індексну, пряму, стекову, непряму, бітову та відносну. В залежності від довжини операнду режим адресації ділиться на короткий – 1 байт, довгий – 2 байти та розширений – 3 байти.

З практичної точки зору, в першу чергу слід звернути увагу на єдиний 24-бітовий адресний простір, в якому розміщено Flash-пам'ять, ОЗУ, Eeprom, а також регістри периферії. Це істотно спрощує написання коду, наприклад, функції для роботи з масивами з ОЗУ і Flash-пам'яті не потрібно писати в декількох примірниках. Коди різних стеків і бібліотек легко перетворюються, так як в основному розраховані на архітектуру фон Неймана (в сенсі адресного простору). При цьому шини для доступу до різних типів пам'ятей розділені, що вказує на наявність Гарвардської архітектури.

Мікроконтролери сімейства STM32 – це сімейство 32 розрядних мікро контролерів, які побудовані на базі ARM архітектури. На даний момент виготовляються мікроконтролери на базі ядра Cortex-M0, Cortex-M0+, Cortex-M3, Cortex-M4F, Cortex-M7F.

Мікроконтролери сімейства STM32 володіють наступними характеристиками: тактова частота 32-400МГц, флеш пам'ять 256-2048 кб, SRAM пам'ять 20-1024 кб.

Мікроконтролери можна поділити на 3 категорії за сферою застосування:

Ultra low power – до яких належать сімейства L0, L1, L4. Дані мікроконтролери характеризуються зменшенням споживання енергії [70].

Mainstream – до яких належать сімейства F0, F1, F3. Дані мікроконтролери є середні по продуктивності та енергоспоживанню [71].

High Performance – до яких належать сімейства F2, F4, F7, H7. Дані мікроконтролери мають збільшену обчислювальну потужність та енергоспоживання [72].

STM надає власні середовища розробки для програмування мікроконтролерів. Також існують безкоштовні аналоги для розробки і проектування компонент [73]. STM мікроконтролери широко використовуються у індустрії оскільки спроектовані спеціально для роботи у складних умовах.

### 1.5.2 Аналіз сучасних мікрокомп'ютерів

В ряді випадків, для опрацювання даних від датчиків чи керування контролерами, необхідно використовувати мікрокомп'ютери. Загалом, одноплатний комп'ютер (SBC) – це компактний пристрій, де на одній друкованій платі встановлені: мікропроцесор, оперативна пам'ять, системи введення-виведення, а також інші модулі, необхідні для функціонування комп'ютера. Компактність такої системи на кристалі, робить пристрій досить дешевим, але розширення можливостей, чи зміна процесора або пам'яті – досить ускладнене, через невеликі розміри компонентів і їх близьке розміщення на платі.

На відміну від настільного персонального комп'ютера, одноплатові комп'ютери часто не покладаються на слоти розширення для периферійних функцій або розширення. Одноплатні комп'ютери були побудовані з використанням широкого спектру мікропроцесорів. Прості конструкції, такі як побудовані комп'ютерними хобістами, часто використовують статичну оперативну пам'ять і недорогі 8 або 16-бітні процесори. Інші типи, наприклад, блейд-сервери, будуть виконуватись аналогічно серверному комп'ютеру, лише в більш компактному форматі.



Мініатюрні комп'ютери загального призначення на зразок Raspberry Pi з малим енергоспоживанням і відкритої ОС. Як правило, вони засновані на архітектурі ARM, несумісної з IBM PC, за можливостями/продуктивності вони найближче до планшетів/смартфонам без екрану, але з HDMI-відеовиходом. Передбачуване призначення таких комп'ютерів – навчальні ПК, АРМи, медіацентри, домашні сервери, керуючі комп'ютери в різних хобі-проектах.

Одноплатний мікрокомп'ютер Raspberry Pi є перспективною платформою для систем автоматизації, який характеризується низькою ціною, своєю операційною системою та відкритістю архітектури. Мікрокомп'ютер Raspberry Pi побудований на системі (SoC) Broadcom BCM2835, яка включає в себе процесор ARM із тактовою частотою 700 МГц, графічний процесор VideoCore IV, і 512 або 256 мегабайт оперативної пам'яті, в якості додаткової пам'яті використовується SD картка. Даний мікрокомп'ютер випускається у двох версіях: молодша (А) (256 Мб ОЗП, один USB - порт) і старша (В) (з Ethernet, 512 Мб ОЗП, два USB - порти) [74].

Для Raspberry Pi випущені спеціалізований дистрибутив Linux, Raspbian OS (він заснований на дистрибутиві Debian) і ряд застосунків Pi-Store, де є як платні, так і безплатні програми. Raspberry Pi має власні порти GPIO, які можна задіяти під різні функції.

На даний момент існує 8 модифікацій RaspberryPi, які різняться за частотою процесора 700-1400МГц, розміром оперативної пам'яті в межах від 256кб до 1 Гб та кількістю ядер 1-4. Модифікації також відрізняються по кількості USB портів, наявністю Ethernet, Wifi та Bluetooth.

## 1.6 Аналіз програмних засобів

За останнє десятиліття з'явилося кілька технологічних мов програмування ПЛК, для яких розроблений стандарт МЕК 61131. Даний стандарт регламентує зміни в галузі мов програмування для систем управління технологічними процесами. Цей стандарт охоплює вимоги до апаратних засобів, монтажу,

тестування, документації, зв'язку і програмування ПЛК. Стандарт визначає 5 мов програмування, які діляться на текстові та графічні. До текстових мов ПЛК відносяться: Instruction List (IL) – мова інструкцій; Structured Text (ST) – мова структурованого тексту.

Мова IL – типовий асемблер з акумулятором та переходами за позначками. Набір інструкцій стандартизовано, він не залежить від конкретної цільової платформи. Дана мова забезпечує роботу з будь-якими типами даних, викликати функції та функціональні блоки, реалізовані іншими мовами. За допомогою IL реалізуються алгоритми будь-якої складності [75].

Мова ST – це мова високого рівня, яка синтаксично подібна до мови Паскаль. Замість процедур мови Паскаль в ST використовуються компоненти програм стандарту МЕК [76].

До графічних мов ПЛК відносяться: Sequential Function Chart (SFC) – мова послідовних функціональних діаграм; Function Block Diagram (FBD) – мова функціонально-блокових діаграм; Ladder Diagrams (LD) – мова релейно-контактних схем;

Мова SFC – високорівневий графічний інструмент, у якій графічна діаграма складається із кроків і переходів між ними. Дозвіл переходу визначається умовою, а з кроком пов'язані певні дії.

Мова FBD – орієнтована на опис принципових схем електронного пристрою на мікросхемах. Провідники в FBD використовуються для передачі сигналів будь-якого типу (логічний, аналоговий, час тощо). Сигнали з виходів блоків можуть подаватися на входи інших блоків або безпосередньо на виходи ПЛК. Самі блоки, подані на схемі як «чорні ящики» можуть виконувати будь-які функції. За допомогою мови FBD забезпечується опис взаємозв'язку входів і виходів діаграми. Якщо алгоритм добре описується з позиції сигналів, то його FBD-подання завжди виходить наочніше, ніж у текстових мовах.

Мова LD – орієнтована на реалізацію структури електричних ланцюгів. Графічно LD- діаграма подається у вигляді двох вертикальних шин живлення. Між ними розмішені ланцюги, утворені з'єднанням контактів. Навантаженням

кожному ланцюгу служить реле. Кожне реле має контакти, які можна використати в інших ланцюгах. Послідовне (І), паралельне (АБО) з'єднання контактів та інверсія (НЕ) утворюють базис Буля. У результаті мова LD ідеально підходить не тільки для побудови релейних автоматів, але й для програмної реалізації комбінаційних логічних схем. Завдяки можливості використання в LD функцій і функціональних блоків, виконаних іншими мовами, галузь її застосування збільшується.

Мови із стандарту МЕК 61131 розроблені на основі найпопулярніших мов програмування для сучасних контролерів. Програми, які написані для сучасних контролерів, можна перенести в середовище МЕК 61131-3 із мінімальними затратами. Особливістю стандарту МЕК 61131 є можливість створення апаратно-незалежних бібліотек для реалізації регуляторів, фільтрів, керування приводами, модулі з нечіткою логікою тощо.

Для програмування контролерів мовами стандарту МЕК 61131-3 розроблено середовище програмування CoDeSys (Controllers Development System) [77, 78], редактори та налагоджувальні засоби якого ґрунтуються на принципах популярних середовищах професійного програмування (VisualC++ [79], тощо). Особливістю середовища програмування CoDeSys є те, воно не прив'язане до конкретної апаратної платформи. Під різні ПЛК здійснено модифікацію середовища програмування шляхом адаптації програми до низькорівневих ресурсів - розподілу пам'яті, інтерфейсів зв'язку та інтерфейсів введення-виведення. Середовища CoDeSys забезпечує: пряму генерацію машинного коду; повноцінну реалізація мов стандарту МЕК 61131-3; інтелектуальні редактори мов, які виправляють типові для початківців помилки; вбудований емулятор контролера, що забезпечує налагодження проекту без додаткових апаратних засобів; вбудовані елементи візуалізації забезпечують створення моделі об'єкту управління та налагодження проекту без виготовлення засобів імітації; використання готових бібліотек і сервісних функцій.

Для об'єднання між собою провідними та безпроводними каналами та під'єднання до мережі Інтернет давачів, мікроконтролерних систем і виконавчих механізмів у БСУЕП використовується технологія Device Hive [80].

### 1.7 Формування вимог та вибір принципів розробки системи управління енергоефективністю підприємства

Розвиток сучасних підприємств тісно зв'язаний з підвищенням їх енергоефективності, яка залежить від збалансованого і ощадливого споживання енергетичних ресурсів, технологій виробництва, використовуваного обладнання та системи управління енергоефективністю технологічних процесів. Для оцінювання енергоефективності підприємства використовуються низка показників, серед яких енергоємність, яка визначає рівень витрат паливно-енергетичних ресурсів на одиницю виробленої продукції.

Підвищення енергоефективності підприємства є комплексною задачею, вирішення якої передбачає розроблення та реалізацію низки системних управлінських рішень на кожному рівні управління енергоефективністю технологічних процесів. Важливим інструментом підвищення енергоефективності підприємств є використання інтелектуальних інформаційних технологій при розробці багаторівневої системи управління енергоефективністю підприємства.

Останні роки характеризуються інтенсивним впровадженням на підприємствах Smart-технологій для управління енергоефективністю технологічними процесами. Використання на підприємствах Smart-технологій веде до накопичення великих обсягів інформації про динаміку технологічних та бізнес процесів. Для розв'язання поставлених задач на підприємстві необхідно створити сховище даних розподіленого чи централізованого типу, забезпечити зберігання інформації, необхідної для аналізу енергоефективності та забезпечити доступ до неї у відповідності до наданих повноважень. Опрацювання цієї інформації за допомогою технологій обчислювального

інтелекту забезпечує отримання знань, на основі яких можна ефективно управляти підприємством і його енергоефективністю та прогнозувати його подальшу діяльність.

Сучасна БСУЕП на підприємстві повинна забезпечувати розв'язання таких задач: збір у реальному часі даних про протікання технологічних процесів; створення єдиного інформаційного простору з достовірною, повною та оперативною інформацією шляхом інтеграції баз технологічних даних і Інтернет-серверів; доступу до необхідної інформації в будь-який час з будь-якого місця за допомогою різних засобів; зберігання та попереднє опрацювання технологічних даних; прогнозування та управління технологічними процесами; налаштування параметрів технічних засобів у залежності від умов навколишнього середовища; складання та аналіз енергобалансів виробництва та споживання енергоносіїв; формування звітів із енергоефективності та створення їх шаблонів; інтеграція різноманітних даних за допомогою баз, сховищ даних і інтернет-серверів; опрацювання технологічних даних, представлення результатів опрацювання у вигляді графіків і діаграм; захист даних у системі від несанкціонованого доступу; моделювання технологічних процесів і визначення шляхів підвищення їх енергоефективності; планування та прогнозування розвитку енергоефективності підприємства; формування для кожного рівня управління ефективних управлінських рішень, які ґрунтуються на результатах опрацювання оперативної достовірної інформації; вдосконалення БСУЕП та контроль управлінських рішень.

При розробці БСУЕП доцільно орієнтуватися на широке використання телекомунікаційних і Web технологій, баз даних, СУБД, сховищ та просторів даних, компонентів збору, оцінювання, оперативного аналітичного та інтелектуального опрацювання інформації, візуалізації результатів її опрацювання та прийняття управлінських рішень. Управлінські рішення, які формуються на кожному рівні управління БСУЕП, необхідно спрямовувати на оптимізацію технологічних процесів і зменшення енергоємності виробництва одиниці продукції.

Структура БСУЕП має бути орієнтована на збір даних, створення бази даних з оперативною, достовірною, повною інформацією, опрацювання її, підготовки управлінських рішень. Особливістю роботи БСУЕП має бути: висока гнучкість налаштування, можливість дистанційного контролю, а також використання дротових і бездротових інтерфейсів для взаємодії між складовими системи.

Комп'ютерні складові, які використовуються для синтезу БСУЕП, мають забезпечувати розв'язання задач у реальному часі. Зокрема, це задачі фільтрації, попереднього опрацювання даних та управління виконавчими механізмами. Застосування комп'ютерних складових безпосередньо біля давачів і виконавчих механізмів, накладає жорсткі обмеження на їхні масогабаритні характеристики. Одночасно, до таких модулів висуваються жорсткі вимоги до споживаної потужності, що впливає на габарити джерел живлення та засобів відведення тепла. Крім того, до таких модулів висуваються високі вимоги щодо живучості та надійності [81]. Комп'ютерні компоненти БСУЕП мають забезпечувати перевірку працездатності та швидку локалізацію неполадок.

Розроблення БСУЕП пропонується здійснювати з використанням системного підходу [82], який охоплює всі рівні інтеграції процесів і апаратно-програмних засобів. Синтез БСУЕП доцільно здійснювати на базі готових апаратних і програмних засобів, оскільки розроблення та виготовлення нових вимагає значних коштів і часу. При виборі складових розроблюваної системи необхідно враховувати множину факторів, а саме: інформацію про готові апаратно-програмні модулі, їх технічні характеристики, відповідність інтерфейсів стандартам, можливості їх покупки та інше.

Однією з найпоширеніших вимог до складових БСУЕП є забезпечення режиму реального часу, що накладає певні обмеження на час розв'язання задачі. Однією із таких умов є забезпечення розв'язку задачі без накопичення затримок. Для розв'язання задачі у реальному часі продуктивність комп'ютерних засобів повинна відповідати наступному співвідношенню:

$\Pi \geq \frac{\beta R F_d k n_k}{N n}$ , де  $R$  – складність алгоритмів розв’язання задач;  $\beta$  – коефіцієнт врахування особливостей засобів реалізації алгоритму розв’язання задачі,  $N$  – кількість даних,  $n$  – розрядність даних,  $F_d$  – частота надходження вхідних даних,  $k$  – кількості каналів надходження даних та  $n_k$  – розрядності каналів надходження даних.

Зменшення масогабаритних характеристик, енергоспоживання, підвищення надійності та швидкодії складових комп’ютерних засобів може бути досягнуто шляхом їх реалізації у вигляді системи на кристалі (SoC) та надвеликих інтегральних схем (НВІС). При НВІС-реалізації складових БСУЕП вони повинні забезпечити високу ефективність використання обладнання, яка зв’язує продуктивність з витратами обладнання та дає оцінку елементам компонентів за продуктивністю. Ефективність використання обладнання враховує кількість виводів інтерфейсу, однорідність структури, кількість і локальність зв’язків між елементами у компоненті [83].

Задача розроблення апаратних складових реального часу, орієнтованих на НВІС-реалізацію, з високою ефективністю використання обладнання зводиться до мінімізації апаратних затрат, кількості виводів інтерфейсу, збільшення однорідності структури та регулярності зв’язків.

При апаратній реалізації алгоритмів розв’язання задачі висока ефективність використання обладнання досягається шляхом узгодження інтенсивності надходження вхідних  $P_d = k n F_d$ , де  $k$  – кількість каналів надходження вхідних даних;  $n$  – розрядність каналів надходження даних;  $F_d$  – частота надходження даних, із обчислювальною інтенсивністю апаратних засобів  $D_a = m n_h F_k$ , де  $m$  – кількість трактів опрацювання;  $n_h$  – розрядність трактів опрацювання;  $F_k$  – тактова частота опрацювання даних.

При розробленні комп’ютерних складових БСУЕП для забезпечення ефективного відлагодження в їх склад необхідно ввести засоби, які забезпечать керуваність (можливість запустити, зупинити та продовжити роботу з будь-якої адреси), спостережуваність (слідкування за її поведінкою та зміною внутрішніх

станів) і передбачуваність (встановлення у стан, з якого всі наступні стани можуть бути передбачені).

При розробці БСУЕП доцільно використовувати такі принципи [84]: компонентно-ієрархічний, який передбачає поділ процесу розробки на ієрархічні рівні та види забезпечення (алгоритмічне, апаратне та програмне); системної інтеграції, який використовує як горизонтальну, так і вертикальну інтеграцію готових складових і базових проектних рішень при розробці систем управління; інтеграції інформаційних і інтелектуальних технологій, комп'ютерних, комунікаційних і алгоритмічних засобів; змінного складу обладнання, що передбачає наявність ядра та змінних програмно-апаратних модулів, за допомогою яких ядро адаптується до вимог конкретного застосування; модульності, який передбачає розробку складових у вигляді функціонально завершених модулів, що мають вихід на стандартний інтерфейс; відкритості програмно-апаратного забезпечення до нарощування та оновлення функцій; сумісності, який передбачає використання стандартних провідних і безпроводних інтерфейсів для зв'язку між компонентами системи.

## 1.8 Висновки до розділу 1

1. Проаналізовано основні аспекти технології Індустрії 4.0, яка дає змогу забезпечити високий рівень конкурентоспроможності сучасних підприємств. Результати аналізу дають змогу стверджувати, що подальший розвиток енергетичного сектору України неможливий без впровадження принципів технології "Industry 4.0".

2. Проведено аналіз існуючих систем та стандартів управління підприємствами, а саме: ANSI ISA-95 та IEC 62264-1. Застосування стандарту ANSI ISA-95 дає змогу зменшити час для інтеграції системи управління на підприємстві, підвищити успішність завершення інтеграції системи, зменшити витрати на розгортання системи, оскільки використовують стандартні формати та програмні модулі. Ґрунтуючись на проведеному аналізі розроблено базову структуру системи управління підприємством, яка складається з трьох рівнів:



збору даних та управління виконавчими механізмами; контролю та управління технологічними процесами; операторського контролю та формування управлінських рішень. Окрім того, сформовано вимоги до технічного забезпечення кожного з ієрархічних рівнів.

3. На основі вищепроведеного аналізу сформовано вимоги до розроблення базових засобів БСУЕП, в саме: доцільно використовувати такі підходи: перший – на основі використання універсальних обчислюваних засобів (комп'ютерів, мікропроцесорів і мікроконтролерів) шляхом розроблення спеціалізованого програмного забезпечення; другий – з використанням спеціалізованих засобів ПЛІС, які апаратно реалізують алгоритми роботи засобів БСУЕП; третій – з використанням функціонально-орієнтованих засобів (систем на кристалі, універсальних обчислювальних засобів доповнених апаратними розширювачами, які реалізують базові алгоритми та складні базові операції). Пропонується розроблення вискоєфективних засобів збору та опрацювання в БСУЕП здійснювати на основі комплексного підходу, який ґрунтується на можливостях сучасної елементної бази та охоплює методи і алгоритми опрацювання даних, архітектури компонентів, враховує вимоги конкретних застосувань та інтенсивності надходження даних.

4. Проаналізовано базові елементи для синтезу програмних та апаратних засобів збору і опрацювання даних в БСУЕП та інтерфейси комунікації між ними. Визначено їх переваги і недоліки та особливості практичного використання.

5. На основі проведеного аналізу та дослідження, сформовано вимоги до БСУЕП та обґрунтовано її реалізацію на основі модульно-ієрархічного підходу з використанням готових елементів і базових проектних рішень та таких принципів: системної інтеграції, змінного складу обладнання, модульності побудови, відкритості та сумісності програмно-апаратного забезпечення.

## РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ ОБМІНУ ТА ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ

Вдосконалено метод синтезу засобів збору та опрацювання даних в багаторівневих систем управління підприємством. Розроблено інформаційну модель структури синтезованих засобів та вдосконалено метод обміну і збереження технологічних даних та таблично-алгоритмічний метод обчислення скалярного добутку в нейроподібних системах.

2.1 Розроблення методу вибору елементної бази для синтезу засобів збору та опрацювання даних в багаторівневої системи управління підприємством

Для вибору елементної бази для синтезу складових БСУЕП розроблено метод, який ґрунтується на застосуванні теорії багатокритеріального аналізу та враховує вимоги конкретного застосування (продуктивність, обсяг пам'яті, потужність енергоспоживання, швидкості передачі даних, діапазон зміни вимірюваної величини, похибки вимірювання, вартості, маса, габарити, температурний діапазон, надійність, стійкості до спец факторів і інше). Основою методу вибору елементної бази для синтезу складових БСУЕП є обчислення її інтегрованої оцінки ефективності на основі часткових критеріїв ефективності, які формуються для кожного конкретного застосування. Обчислення інтегрованої оцінки ефективності будемо здійснювати за схемою компромісів [85]. За даною схемою інтегрована оцінка ефективності  $j$ -ї елементної бази  $E_{IEBj}$  обчислюється у відповідності з виразом [86, 87, 88]:

$$\max E_{IEBj} = \sum_{i=1}^n \lambda_i E_{nEli}, \quad (2.1)$$

де:  $\lambda_i$  –  $i$ -й ваговий коефіцієнт, що визначає відносну важливість  $i$ -го часткового критерію;  $E_{nEli}$  – нормована оцінка ефективності  $i$ -го часткового

критерію;  $n$  -кількість включених в згортку часткових критеріїв ефективності елементної бази.

Метод вибору елементної бази для синтезу складових БСУЕП вимагає виконання таких етапів:

- сформувати перелік часткових критеріїв, від яких залежить ефективність елементної бази;
- визначити шкалу зміни числових значень часткових критеріїв ефективності елементної бази;
- визначити множину елементної бази, які відповідають вимогам технічного завдання для компонентів БСУЕП;
- визначити значень вагових коефіцієнтів, які визначають відносну важливість  $i$ -го часткового критерію;
- обчислити значення  $i$ -х часткових нормованих критеріїв ефективності для елементної бази;
- обчислити інтегровану оцінку ефективності кожної  $j$ -ї елементної бази; порівняти та вибрати елементну базу для синтезу складових БСУЕП.

*На першому етапі* вибору елементної бази для синтезу складових БСУЕП формується перелік часткових критеріїв ефективності елементної бази. Перелік часткових критеріїв ефективності елементної бази для синтезу складових БСУЕП наведений в табл. 2.1.

*На другому етапі* вибору елементної бази для синтезу складових БСУЕП визначається шкала зміни числових значень часткових критеріїв ефективності елементів апаратно-програмних модулів. Формування шкали змін числових значень часткових критеріїв здійснюється на основі технічного завдання на розробку складових і БСУЕП.

*На третьому етапі* вибору елементної бази для синтезу складових БСУЕП визначається множина елементів, які відповідають вимогам технічного завдання на синтез БСУЕП. Для вибору такої множини використовуються

порогові коефіцієнти. Вибір множини можливої елементної бази для синтезу складових БСУЕП виконується за такими формулами:

$$W_{\text{Елк}} = \sum_{j=1}^N E_{\text{Лк}j} n_j q_j p_j c_j m_j s_j t_j h_j \gamma_j, \quad (2.2)$$

$$W_{\text{Елз}} = \sum_{i=1}^N E_{\text{Лз}j} v_j p_j c_j m_j s_j t_j h_j \gamma_j, \quad (2.3)$$

Таблиця 2.1

Перелік часткових критеріїв ефективності елементної бази для синтезу складових БСУЕП

Назва критерію	Позначення
Продуктивність $j$ -ї апаратно-програмної компоненти	$P_j$
Обсяг пам'яті $j$ -ї апаратно-програмної компоненти и	$Q_j$
Надійність $j$ -ї апаратно-програмної компоненти	$H_j$
Швидкість передачі даних $j$ -м апаратно-програмним компонентом	$V_j$
Потужність енергоспоживання $j$ -м апаратно-програмним компонентом	$P_j$
Зручність роботи користувачів (кількість одночасно виконуваних інтерактивних задач)	$K_j$
Діапазон зміни вимірюваної величини $j$ -м давачем	$D_j$
Похибка вимірювання $j$ -м давачем	$G_j$
Маса $j$ -о апаратно-програмного компонента	$M_j$
Габарити $j$ -о апаратно-програмного компонента	$S_j$
Максимальна температура роботи $j$ -о апаратно-програмного компонента	$t_{\text{max}}$
Мінімальна температура роботи $j$ -о апаратно-програмного компонента	$t_{\text{min}}$
Стійкість $j$ -о апаратно-програмного компонента до спецфакторів (радіація)	$\gamma_j$
Вартість апаратних засобів $j$ -о апаратно-програмного компонента	$C_{Aj}$
Вартість загальносистемних програмних засобів $j$ -о апаратно-програмного компонента	$C_{ЗПЗj}$
Вартість спеціалізованих програмних засобів $j$ -о апаратно-програмного компонента	$C_{СПЗj}$
Витрати на експлуатацію $j$ -о апаратно-програмного компонента	$C_{\text{Експ}j}$

$$W_{E\lambda\delta} = \sum_{i=1}^N E_{L\delta_j} p_j d_j g_j c_j m_j s_j t_j h_j \gamma_j, \quad (2.4)$$

де  $W_{E\lambda\kappa}$ ,  $W_{E\lambda\gamma}$ ,  $W_{E\lambda\delta}$  – множина елементів відповідно комп'ютерних, зв'язку та давачів;  $E_{L\kappa_j}$ ,  $E_{L\gamma_j}$ ,  $E_{L\delta_j}$  –  $j$ -й елемент множин відповідно комп'ютерних, зв'язку та давачів;  $N$  – кількість елементів множини;  $n_j$ ,  $q_j$ ,  $p_j$ ,  $v_j$ ,  $d_j$ ,  $g_j$ ,  $c_j$ ,  $m_j$ ,  $s_j$ ,  $t_j$ ,  $h_j$ ,  $\gamma_j$  – порогові коефіцієнти  $j$ -ї елементної бази відповідно за продуктивністю, обсягом пам'яті, потужності енергоспоживання, швидкості передачі даних, діапазону зміни вимірюваної величини, похибки вимірювання, вартості, маси, габаритів, температурного діапазону, надійності, стійкості до спец факторів.

Порогові коефіцієнти для вибору множини елементів за продуктивністю  $n_j$ , обсягом пам'яті  $q_j$ , потужністю енергоспоживання  $p_j$ , швидкості передачі даних  $v_j$ , діапазону зміни вимірюваної величини  $d_j$ , похибки вимірювання  $g_j$ , вартості  $c_j$ , маси  $m_j$ , габаритів  $s_j$ , температурного діапазону  $t_j$ , надійності  $h_j$ , стійкості до спец факторів  $\gamma_j$  визначаються так:

$$n_j = \begin{cases} 0, & \text{коли } P_j < P_3 \\ 1, & \text{коли } P_j \geq P_3 \end{cases}, \quad (2.5)$$

$$p_j = \begin{cases} 0, & \text{коли } P_j > P_3 \\ 1, & \text{коли } P_j \leq P_3 \end{cases}, \quad (2.6)$$

$$v_j = \begin{cases} 0, & \text{коли } V_j < V_3 \\ 1, & \text{коли } V_j \geq V_3 \end{cases}, \quad (2.7)$$

$$d_j = \begin{cases} 0, & \text{коли } D_j < D_3 \\ 1, & \text{коли } D_j \geq D_3 \end{cases}, \quad (2.8)$$

$$g_j = \begin{cases} 0, & \text{коли } G_j > G_3 \\ 1, & \text{коли } G_j \leq G_3 \end{cases}, \quad (2.9)$$

$$c_j = \begin{cases} 0, & \text{коли } C_j > C_3 \\ 1, & \text{коли } C_j \leq C_3 \end{cases}, \quad (2.10)$$

$$m_j = \begin{cases} 0, & \text{коли } M_j > M_3 \\ 1, & \text{коли } M_j \leq M_3 \end{cases}, \quad (2.11)$$

$$s_j = \begin{cases} 0, & \text{коли } S_j > S_3 \\ 1, & \text{коли } S_j \leq S_3 \end{cases}, \quad (2.12)$$

$$t_j = \begin{cases} 0, & \text{коли } t_{\min j} < t_{\min 3} \text{ або } t_{\max j} < t_{\max 3} \\ 1, & \text{коли } t_{\min j} > t_{\min 3} \text{ і } t_{\max j} > t_{\max 3} \end{cases}, \quad (2.13)$$

$$h_j = \begin{cases} 0, & \text{коли } H_j < H_3 \\ 1, & \text{коли } H_j \geq H_3 \end{cases}, \quad (2.14)$$

$$\gamma_j = \begin{cases} 0, & \text{коли } \gamma_j < \gamma_3 \\ 1, & \text{коли } \gamma_j > \gamma_3 \end{cases}, \quad (2.15)$$

де  $P_3, Q_3, R_3, V_3, D_3, \beta_3, C_3, M_3, S_3, t_3, H_3, \gamma_3$  – задані в технічному завданні параметри відповідно продуктивності, обсягу пам'яті, потужності енергоспоживання, швидкості передачі даних, діапазону зміни вимірюваної величини, похибки вимірювання, вартості, маси, габаритів, температурного діапазону, надійності, стійкості до спец факторів.

На четвертому етапі вибору елементної бази для синтезу апаратно-програмних складових БСУЕП визначаємо значення вагових коефіцієнтів  $\lambda_i$  для часткових критеріїв ефективності елементів. Значення вагових коефіцієнтів визначається важливістю критерію для функціонування БСУЕП. При визначенні вагових коефіцієнтів необхідно враховувати наступне, що сума всіх вагових коефіцієнтів повинна бути рівна одиниці  $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ . Визначення вагових коефіцієнтів здійснюємо шляхом експертного опитування [89, 90]. В процесі розроблення технічних систем досить часто використовують метод приписування балів або метод ранжування.

Для прикладу, використовуємо метод ранжування до визначення значень вагових коефіцієнтів.

У випадку, коли критерії оптимальності не рівноцінні  $l$  - експертів та  $n$  - часткових критеріїв  $f_i(\bar{x})$ , де  $i = \overline{1, n}$ .

Цифрою 1 – позначаємо найбільш важливий КО, 2 – наступний за важливістю і цифрою  $n$  - критерій з найменшим значенням важливості.

На наступному кроці присвоюємо ранг кожному КО. Ранг 1 має оцінку  $n$  і є найбільш важливим з точки зору експерта, а ранг 2 – оцінка  $(n-1)$  і так далі до рангу  $n$ , якому присвоюємо оцінку 1.

Позначимо ранг  $i$ -го критерію (всіх  $\in n$ )  $k$ -им експертом (який  $\in l$ )  $r_i^{(k)}$  вагові коефіцієнти  $w_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  визначається з допомогою наступної формули:

$$C_i = \frac{\sum_{k=1}^l r_i^{(k)}}{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l r_i^{(k)}}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2.16)$$

Цей метод визначення вагових коефіцієнтів є одним з найпростіших і широко використовується в процесі розроблення складних технічних систем.

На *п'ятому етапі* вибору елементної бази для синтезу апаратно-програмних складових БСУЕП виконується нормування часткових критеріїв ефективності. Нормування критеріїв ефективності продуктивності, обсягу пам'яті, потужності енергоспоживання, швидкості передачі даних, вартості, маси, габаритів і надійності виконується за такими формулами:

$$E_{n\Pi_j} = \frac{\Pi_j}{\Pi_3}, \quad (2.17)$$

$$E_{nQ_j} = \frac{Q_j}{Q_3}, \quad (2.18)$$

$$E_{nP_j} = \frac{P_j}{P_3}, \quad (2.19)$$

$$E_{nV_j} = \frac{V_j}{V_3}, \quad (2.20)$$

$$E_{nC_j} = \frac{C_j}{C_3}, \quad (2.21)$$

$$E_{nM_j} = \frac{M_j}{M_3}, \quad (2.22)$$

$$E_{nS_j} = \frac{S_j}{S_3}, \quad (2.23)$$

$$E_{нНj} = \frac{H_j}{H_3}, \quad (2.24)$$

де  $E_{нПj}$ ,  $E_{нQj}$ ,  $E_{нPj}$ ,  $E_{нVj}$ ,  $E_{нCj}$ ,  $E_{нMj}$ ,  $E_{нSj}$ ,  $E_{нНj}$  – нормована ефективність критеріїв  $j$ -х елементів відповідно продуктивності, обсягу пам'яті, потужності енергоспоживання, швидкості передачі даних, вартості, маси, габаритів і надійності.

Можна використати і інші методи нормування часткових коефіцієнтів оптимальності.

Зокрема, якщо відомо діапазон зміни від  $f^{\min}$  до  $f^{\max}$ , то використовують наступні вирази для нормування часткових коефіцієнтів оптимальності:

$$f_{H,i} = \frac{f_i^0}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, \quad \text{де } i = 1, 2, \dots, m, \quad (2.25)$$

$$\text{чи } f_{H,i} = \frac{f_i^0 - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \quad \text{де } i = 1, 2, \dots, m. \quad (2.26)$$

На шостому етапі вибору елементної бази для синтезу апаратно-програмних складових БСУЕП виконується обчислення інтегрованої оцінки ефективності  $j$ -ї елементної бази, яка використовується для синтезу комп'ютерних засобів, засобів зв'язку та давачів. Обчислення інтегрованої оцінки ефективності  $j$ -ї елементної бази, яка використовується для синтезу комп'ютерних засобів  $E_{IEлкj}$ , засобів зв'язку  $E_{IEлзj}$  і давачів  $E_{IEлдж}$  виконується за наступними формулами:

$$E_{IEлкj} = \lambda_{П} E_{нПj} + \lambda_{Q} E_{нQj} + \lambda_{P} E_{нPj} + \lambda_{C} E_{нCj} + \lambda_{M} E_{нMj} + \lambda_{S} E_{нSj} + \lambda_{H} E_{нНj}, \quad (2.27)$$

$$E_{IEлзj} = \lambda_{V} E_{нVj} + \lambda_{P} E_{нPj} + \lambda_{C} E_{нCj} + \lambda_{M} E_{нMj} + \lambda_{S} E_{нSj} + \lambda_{H} E_{нНj}, \quad (2.28)$$

$$E_{IEлдж} = \lambda_{D} E_{нDj} + \lambda_{G} E_{нGj} + \lambda_{C} E_{нCj} + \lambda_{M} E_{нMj} + \lambda_{S} E_{нSj} + \lambda_{H} E_{нНj}. \quad (2.29)$$



На сьомому етапі вибору елементної бази визначається елементна база, яка буде використовуватися для синтезу апаратно-програмних складових БСУЕП. Із множини елементної бази, що відповідає вимогам технічного завдання, вибирається та елемента база інтегрована оцінка ефективності якої є найбільшими  $E_{IKkj} \max$ ,  $E_{IKzj} \max$  та  $E_{IKdj} \max$ .

Запропонований метод дає змогу автоматизувати вибір найоптимального варіанту елементної бази для синтезу компонент БСУЕП згідно з вимогами технічного завдання. Особливістю розробленого методу є врахування вимог конкретного застосування, що забезпечує вибір найефективнішої елементної бази для синтезу складових БСУЕП.

На практиці зручніш для інтегральної оцінки ефективності її елементної бази, використати мультиплікативну згортку, що дає змогу усунути компенсацію одних часткових критеріїв енергоефективності за рахунок інших, або максимінну чи мінімаксну форми згортки для обчислення інтегральної оцінки ефективності.

Відповідно, вирази (2.27 – 2.28) необхідно записати у наступній формі:

$$E_{IEлkj} = \lambda_{II} E_{nIIj} * \lambda_Q E_{nQj} * \lambda_P E_{nPj} * \lambda_C E_{nCj} * \lambda_M E_{nMj} * \lambda_S E_{nSj} * \lambda_H E_{nHj}, \quad (2.27a)$$

$$E_{IEлzj} = \lambda_V E_{nVj} * \lambda_P E_{nPj} * \lambda_C E_{nCj} * \lambda_M E_{nMj} * \lambda_S E_{nSj} * \lambda_H E_{nHj}, \quad (2.28a)$$

$$E_{IEлdj} = \lambda_D E_{nDj} * \lambda_G E_{nGj} * \lambda_C E_{nCj} * \lambda_M E_{nMj} * \lambda_S E_{nSj} * \lambda_H E_{nHj}. \quad (2.29a)$$

Для загального випадку інтегральна оцінка, яка визначається виразом для мультиплікативної згортки (2.1) має визначатися наступним виразом:

$$\max E_{IEБj} = \prod_{i=1}^n \lambda_i E_{nEлi}.$$

## 2.2 Метод синтезу складових багаторівневої системи управління енергоефективністю підприємства

Вихідною інформацією для синтезу складових БСУЕП є: функції, які повинен виконувати складова БСУЕП; кількість  $N$  і розрядність  $n$  вхідних

даних; вимоги до інтерфейсів зв'язку компонентів (кількість каналів надходження вхідних даних –  $k$ , розрядність каналів надходження даних –  $n_k$ , частота надходження даних –  $F_d$ ); час виконання алгоритмів роботи –  $T_p$ ; точність результатів обчислень; техніко-економічні вимоги і обмеження.

При синтезі складових БСУЕП необхідно забезпечити вимоги технічного завдання і високу ефективність використання обладнання. Кількісно ефективність використання обладнання певної компоненти визначається так:

$$E_k = \frac{\beta_3 R_k}{W_k T_p}, \quad (2.30)$$

де  $\beta_3$  – коефіцієнт, який враховує засоби реалізації алгоритмів,  $W_k$  – апаратні затрати на реалізацію компоненти.

Задача синтезу компоненти БСУЕП з високою ефективністю використання обладнання зводиться до мінімізації апаратних затрат

$$W_k = W_I + W_{II} + W_{III} + W_{IV} \Rightarrow \min, \quad (2.31)$$

де  $W_I$ ,  $W_{III}$ ,  $W_{II}$ ,  $W_{IV}$  - апаратні затрати на реалізацію відповідно інтерфейсу, блоку управління, пам'яті та процесора при забезпеченні режиму реального часу

$$\frac{Nn}{F_d n_k k} \geq T_p. \quad (2.32)$$

В загальному випадку ,вираз можна переписати в наступному виді:

$$W_k = \sum_{i=1}^e \alpha_i W_i,$$

де  $W_i$  - вид апаратних затрат, а  $\alpha_i$  - відносна важливість  $i$ -го виду затрат.

Складність алгоритмів роботи  $R_k$ , час їх виконання  $T_p$  та техніко-економічні вимоги визначають елементну базу та архітектуру складових БСУЕП.

Основними етапами синтезу складових БСУЕП є:

- розроблення алгоритмів роботи комп'ютерного компоненти та подання їх вигляді функціонального графу;
- оцінювання складності алгоритмів роботи і визначення необхідної продуктивності комп'ютерної складової для забезпечення режиму реального часу;
- вибір варіантів реалізації алгоритму;
- синтез архітектури комп'ютерного елемента та визначення порядку реалізації у часі алгоритму роботи;
- визначається кількість і типи інтерфейсів зв'язку комп'ютерного компонента з оточуючим середовищем;
- формуються техніко-економічні вимоги та обмеження для компоненти;
- вибір елементної бази для синтезу складових БСУЕП;
- синтез складових на вибраній елементній базі.

*На першому етапі* синтезу компонентів БСУЕП розробляються алгоритми роботи компонента. Такі алгоритми повинні забезпечувати мінімізацію кількості обмінів і зосередити опрацювання даних на кристалах мікроконтролерів (мікропроцесорів). Для оцінки складності і структурних характеристик алгоритму роботи компоненти подаємо його у вигляді функціонального графу алгоритму  $F=(\Phi, \Gamma)$ , де  $\Phi=\{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n\}$  – множина функціональних операторів,  $\Gamma$  – закон відображення зв'язків між операторами. Функціональний граф алгоритму визначає послідовність і взаємну залежність операцій та використовується для оцінювання складності (кількості операцій) алгоритму роботи компоненти.

*На другому етапі* синтезу компонентів БСУЕП виконується оцінювання

складності алгоритмів роботи компоненти та визначається необхідна продуктивність обчислювальних засобів для забезпечення режиму реального часу. Функціональні графи алгоритмів забезпечують визначення кількості арифметичних і логічних операцій, які необхідні для їх виконання. При визначенні складності  $R_k$  алгоритмів роботи компонентів необхідно також враховувати кількість  $N$  вхідних даних.

Для забезпечення роботи модуля у реальному часі продуктивність її комп'ютерних засобів повинна бути:

$$P \geq \frac{\beta_3 R_k}{T_p}. \quad (2.33)$$

На третьому етапі синтезу складових БСУЕП виконується вибір варіантів реалізації алгоритму. Для вибору варіантів виконання алгоритмів (програмний, апаратний, апаратно-програмний) у модулі необхідно здійснити його просторово-часове відображення у вигляді потокового конкретизованого графа. Конкретизований потоковий граф алгоритму включає дві частини – функціональну та структурну. Функціональна частина визначає операційний базис функціональних макрооператорів, а структурний – зв'язки між ними. Процес розробки потокового конкретизованого графа алгоритму виконується за чотири кроки:

- декомпозиція алгоритму роботи проектованого модуля; проектування комунікацій (обмін даними) між функціональними операторами, які реалізуються програмно та функціональними операторами, які реалізуються апаратно;
- укрупнення функціональних операторів; планування обчислень.

При декомпозиції алгоритм роботи  $\Phi$  розбивається на функціональні оператори  $\Phi_i$ , між якими установлюються зв'язки, що відповідають даному алгоритму. Чим більша степінь деталізації алгоритму отримуємо у результаті декомпозиції, тим легше можна вибрати варіант реалізації. Декомпозицію

алгоритму виконуємо методом функціональної декомпозиції. Використання методу функціональної декомпозиції дає змогу отримати просторово-часове відображення структури алгоритму на рівні операцій арифметичних і логічних операцій  $\Phi_i$ .

На даному кроці визначається можливість його програмної реалізації у реальному часі. У випадку неможливості реалізації алгоритмів програмним шляхом у реальному часі переходять до програмно-апаратної реалізації, при якій визначаються функціональні оператори, які доцільно реалізувати апаратним шляхом, а які - програмним.

На кроці проектування комунікацій для програмно-апаратної реалізації алгоритму необхідно визначити структуру каналів обміну даними між програмними та апаратними засобами.

За результатами перших двох кроків розробки можна оцінити час виконання алгоритмів. У випадку, коли час виконання алгоритмів не забезпечує режим реального часу та необхідно або розпаралелити процес обчислення, або здійснити додаткову апаратну реалізацію функціональних операторів.

На кроці укрупнення функціональні оператори, які реалізуються апаратно відображаються у вигляді макрооператорів.

На кроці планування для відтворення обчислень вводяться оператори управління, які забезпечують планування обчислень та обмінів між програмними та апаратними засобами.

*На четвертому етапі* синтезу складових БСУЕП на основі розробленого потокового конкретизованого графа алгоритму синтезується архітектури компоненти та визначення порядку реалізації у часі функціональних операторів. Для синтезу складових БСУЕП використовується базова архітектура, яка наведена на рис.2.1, де МО – модуль обміну, САЗ – спеціалізовані апаратні засоби.

Базова архітектура складової БСУЕП має змінний склад, ядром якої є процесорне ядро, пристрій обміну та збору даних, які є постійними для всіх

застосувань. В залежності від вимог конкретних застосувань ядро компоненти доповнюється МО, САЗ і інтерфейсами зв'язку.

На п'ятому етапі синтезу складових БСУЕП визначається кількість і типи інтерфейсів зв'язку модуля з оточуючим середовищем (давачами, актюаторами). При виборі типів інтерфейсів необхідно враховувати як інтерфейси комп'ютерної компоненти (мікропроцесорів, мікроконтролерів, систем на кристалі), так і інтерфейси давачів та актюаторів (виконавчих механізмів). Для цього формуємо перелік можливих інтерфейсів комп'ютерного модуля. Сформований перелік можливих інтерфейсів комп'ютерного модуля наведено в таблиці 2.2.

*На шостому етапі синтезу* компонентів БСУЕП на основі технічного завдання формуються техніко-економічні вимоги та обмеження для компоненти.

Основними техніко-економічними вимогами та обмеженнями, які висувається до модуля є: продуктивністю комп'ютерних засобів, обсягом пам'яті, потужність енергоспоживання, швидкості передачі даних, діапазону зміни вимірюваної величини, похибки вимірювання, вартість комплектуючих і компоненти у цілому, маса і габарити компоненти, температурний діапазон роботи, надійність, стійкості до спец факторів і інтерфейси зв'язку комп'ютерних засобів, давачів і актюаторів.

*На сьомому етапі синтезу* складових БСУЕП виконується вибір елементної бази (комплектуючих) для синтезу складових БСУЕП. Вибір елементної бази виконується за методом розробленим у розділі 2.1. Цей метод вимагає формування переліку часткових критеріїв ефективності елементної бази та техніко-економічних вимог та обмежень, які висувається до проєктованого модуля. Крім, того при виборі елементної бази необхідно враховувати існуюче програмне забезпечення для комп'ютерних засобів (мікропроцесорів, мікроконтролерів, систем на кристалі).



Рисунок 2.1 – Базова архітектура складової БСУЕП

На восьмому етапі синтезу складових БСУЕП виконується синтез компоненти на основі елементної бази, яка вибрана на сьомому етапі. Для синтезованої компоненти визначаються функції, які вона виконує та технічні параметри: продуктивність комп'ютерних засобів, обсягом пам'яті, потужністю енергоспоживання, типи та кількість інтерфейсів, діапазону зміни вимірюваної

величини, похибки вимірювання, маса і габарити компоненти, температурний діапазон роботи та надійність.

Таблиця 2.2.

## Перелік інтерфейсів комп'ютерної компоненти [91]

Назва критерію	Позначення
Загальна кількість аналогових портів $j$ -ї апаратно-програмного модуля	$A_j$
Загальна кількість GPIO цифрових портів $j$ -ї апаратно-програмного модуля	$GPIO_j$
Загальна кількість I2C цифрових портів $j$ -ї апаратно-програмного модуля	$I2C_j$
Загальна кількість SPI цифрових портів $j$ -ї апаратно-програмного модуля	$SPI_j$
Загальна кількість допоміжних портів $j$ -ї апаратно-програмного модуля	$O_j$

2.3 Розроблення засобів автоматизованого синтезу засобів збору та опрацювання даних в багаторівневої системи управління енергоефективністю підприємства

Для автоматизованого синтезу складових БСУЕП на основі розроблених методів вибору елементної бази та синтезу компонент багаторівневої системи управління підприємством, розробляються програмні засоби. Алгоритм роботи таких засобів складається із наступних кроків:

Крок 1: Запуск та ініціалізація системи.

Крок 2: Ініціалізація зв'язку із базою даних.

Крок 3: Зчитування вхідних даних про елементну базу.

Крок 4: Зчитування даних про критерії та обмеження пошуку.



Крок 5: Зчитування інформації про необхідну структуру системи (кількість і тип давачів, актюаторів та модулів зв'язку).

Крок 6: Перебір та фільтрація елементної бази згідно із мін/макс значеннями критеріїв елементів.

Крок 7: Нормалізація вагових коефіцієнтів для кожного із критеріїв.

Крок 8: Нормування часткових критеріїв кожного із відфільтрованих елементів.

Крок 9: Обчислення інтегрованої оцінки ефективності для кожного із елементів.

Крок 10: Сортування елементів по спаданню значення інтегрованої ефективності.

Крок 11: Синтез альтернативи з'єднання підмножини елементів у модуль. Валідація інтерфейсів компоненти та відбір альтернатив, які задовольняють сумісності інтерфейсів.

Крок 12: Обчислення інтегрованої оцінки ефективності для кожного із синтезованих модулів.

Крок 13: Сортування елементів по спаданню значення інтегрованої ефективності.

Крок 14: Вивід результатів для користувача.

Представлення даного алгоритму, у формі блок-схеми, представлено на рис.2.2. Даний алгоритм має лінійну структуру та складається із 2-ох послідовних блоків. В процесі практичної реалізації блоки оформлені у вигляді підпрограм:

- підпрограма вибору елементної бази для синтезу складових систем управління підприємством, яка відповідає за завантаження варіантів компонент із бази даних, їхню попередню фільтрацію згідно із заданими техніко-економічними показниками, обчислення інтегрованої оцінки ефективності для кожного компоненту та сортування результатів по спаданню оцінки ефективності.

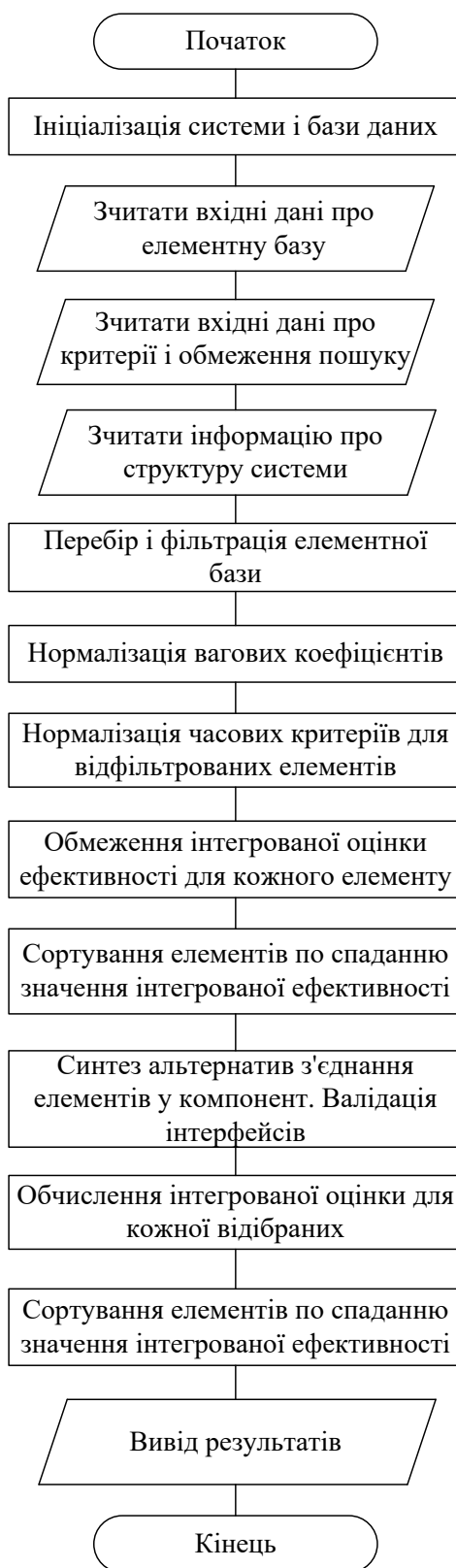


Рисунок 2.2 – Алгоритм синтезу складових багаторівневої системи управління підприємством

-підпрограма синтезу структури компонент систем управління енергоефективністю підприємства, яка отримує на вхід варіанти компонент із першої підпрограми. Після цього відбувається генерації варіантів об'єднання елементів у єдиний компонент. Ці варіанти фільтруються за сумісністю по інтерфейсам. Варіанти, які пройшли валідацію зберігаються та для них обчислюється загальна оцінка ефективності. Варіанти сортуються по спаданню загальної оцінки ефективності.

Отже, розроблений алгоритм дає змогу автоматизувати процес синтезу структури складових БСУЕП з врахуванням інтерфейсів базових компонент та дає змогу підвищити якість проєктованих модулів БСУЕП.

#### 2.4 Інформаційна модель структури синтезованих компонент БСУЕП

Однією з перших кроків розроблення систем різного функціонального призначення є побудова їх структури. Метод синтезу структур складових БСУЕТ наведено вище.

Формалізуємо структуру системи. Інформаційну модель структури системи опишемо з допомогою кортежа наступного виду:

$$S_{TR} = \langle E, Z, M_{IN} \rangle, \quad E = (e_1, e_2, \dots, e_n), \quad Z = (z_1, z_2, \dots, z_m), \quad (2.34)$$

де:  $E$  – множина елементів структури системи;

$n$  – кількість елементів структури системи;

$Z$  – множина зв'язків між елементами структури (ребер);

$M_{IN}$  – матриця інцидентності [92];

$n$  – кількість елементів структури системи;

$m$  – кількість зв'язків між елементами структури системи.

Матриця інцидентності дає змогу відобразити не лише зв'язки, а також і їх напрям. Елементи матриці інцидентності можуть приймати значення 0

(елементи неінцидентні), +1 (зв'язок орієнтований від елемента) та -1, якщо зв'язок орієнтований до елемента.

Наведений математичний вираз (2.34) можна представити в більш компактному виді, оскільки об'єднавши множини  $E$  і  $Z$  маємо граф [93, 94], тоді:

$$S_{TR} = \langle G, M_{IN} \rangle, \quad G = \langle E, Z \rangle. \quad (2.35)$$

Використана модель проста та зручна у застосуванні до процесу синтезу структур складових БСУЕП.

## 2.5 Вдосконалення методу та засобів обміну і збереження технологічних даних

Сучасна система управління енергоефективністю підприємства, як було зазначено вище, є трирівневою. На рівні збору даних та управління виконавчими механізмами формується первинна інформація, яка попередньо опрацьовується, накопичується та надходить на засоби контролю. З використанням даної інформації формуються сигнали для управління виконавчими механізмами та технологічними процесами. Задачі, які розв'язуються на рівні контролю та управління технологічним процесом висувають жорсткі вимоги на час формування управляючих сигналів. Загалом, управління на цих рівнях має відбуватися у реальному часі, тобто гарантовано відкликатись на зовнішні події за визначений час [95, 96, 97].

Ефективна робота БСУЕП на рівні збору даних і управління виконавчими механізмами та рівні контролю і управління технологічними процесами, забезпечується використанням розподілених мікроконтролерних систем, які для збору даних і управління використовують промислові мережі. Приближення мікроконтролерів до сенсорів та об'єкту управління забезпечує скорочення

затрат на кабельні комунікації та підвищує живучість системи. Для ефективної взаємодії між компонентами (сенсори, виконавчими механізмами, промисловими контролерами, мікроконтролерами) БСУЕП широко застосовують промислові мережі, які використовують технологію польових шин. Перевагою промислових мереж є: збільшення віддалей між компонентами системи, можливість дистанційного налаштування сенсорів, наближення засобів опрацювання до сенсорів та виконавчих механізмів. До апаратно-програмних засобів цього рівня висуваються жорсткі вимоги за надійністю, часом реакції на дані, що надходять від сенсорів.

На рівні контролю та управління технологічним процесом здійснюється збір, накопичення даних про технологічний процес, оперативне опрацювання даних, прогнозування поведінки процесів і об'єктів управління. Опрацювання даних на даному рівні зменшує обсяги даних, які необхідно передавати на верхній рівень і тим самим забезпечує зниження вимог до пропускнуої здатності каналів зв'язку. Цей рівень БСУЕП є достатньо автономний, який при відсутності зв'язку з верхнім рівнем здатний тривалий час працювати автономно. Апаратно-програмні засоби даного рівня повинні працювати у реальному часі, тобто гарантовано відкликатись на зовнішні події за час, визначений для кожної такої події.

На рівні операторського контролю та формування управлінських рішень виконуються такі задачі: збір, збереження та опрацювання даних; опрацювання відео-потоків, розпізнавання зображень і сцен в системах технічного зору; формування управлінських рішень; синхронізація єдиного часу в розподіленій системі; синхронізація роботи розподілених підсистем; візуалізація та відображення ходу виконання технологічного процесу [98]. На даному рівні, для операторського контролю та формування управлінських рішень, використовуються робочі станції оператора на RISC- або Intel-платформах, які повинні працювати у реальному часі.

Одними із основних задач БСУЕП є формування у реальному часі єдиного інформаційного простору з повною оперативною інформацією та забезпечення

безконфліктного обміну між компонентами системи [99]. Для розв'язання таких задач необхідно розробити модуль збору, обміну та збереження даних (МЗОЗД). Структура БСУЕП з таким МЗОЗД наведена на рис.2.3.

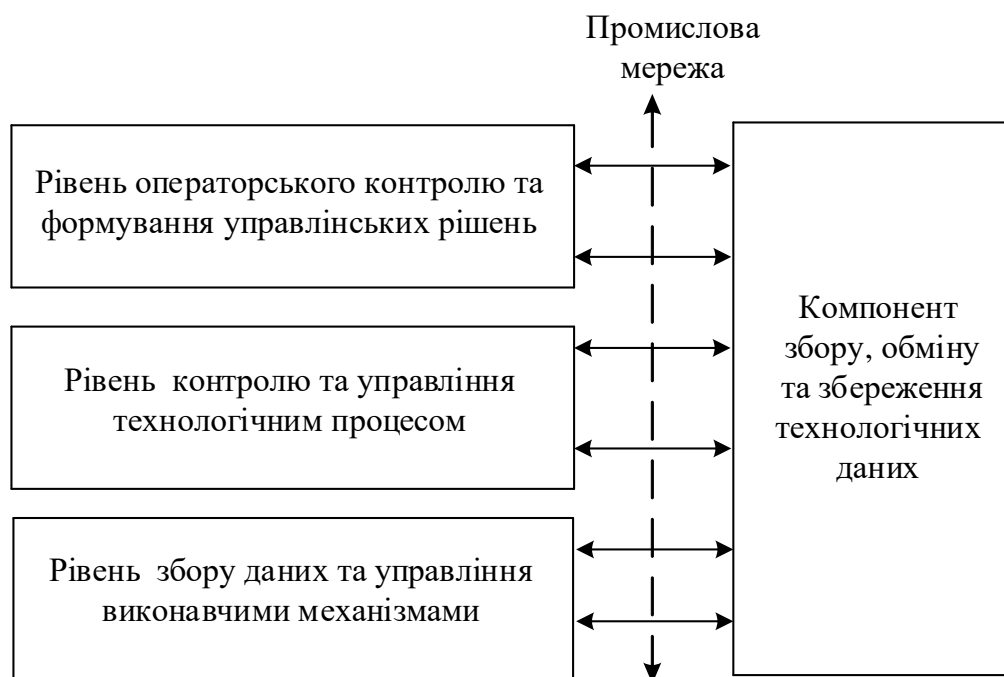


Рисунок 2.3 – Структура БСУЕП з модулем збору обміну та збереження даних

Для забезпечення перерахованих МЗОЗД пропонується синтезувати основі багатопортової пам'яті (БПП). Основними складовими БПП є оперативна швидкодіюча з великим обсягом пам'ять, контролери доступу до пам'яті (КДП) та адаптери інтерфейсів промислова мережа – КДП. Структура МЗОЗД на основі БПП наведена на рис.2.4, ПМ-КДП – промислова мережа–контролер доступу до пам'яті, БУ – блок управління, ШД – шина даних, ША – шина адреси,  $\overline{Cm/3n}$  – вхід читання/запис,  $\overline{Bk}$  – вхід вибірки пам'яті.

В основу синтезу МЗОЗД пропонується покласти метод часового розподілу ресурсів пам'яті між зовнішніми пристроями (робочі станції,

мікропроцесорні системи, інтелектуальні сенсори та виконавчі механізми), які підключаються до МЗОЗД за допомогою інтерфейсів промислової мережі [100].

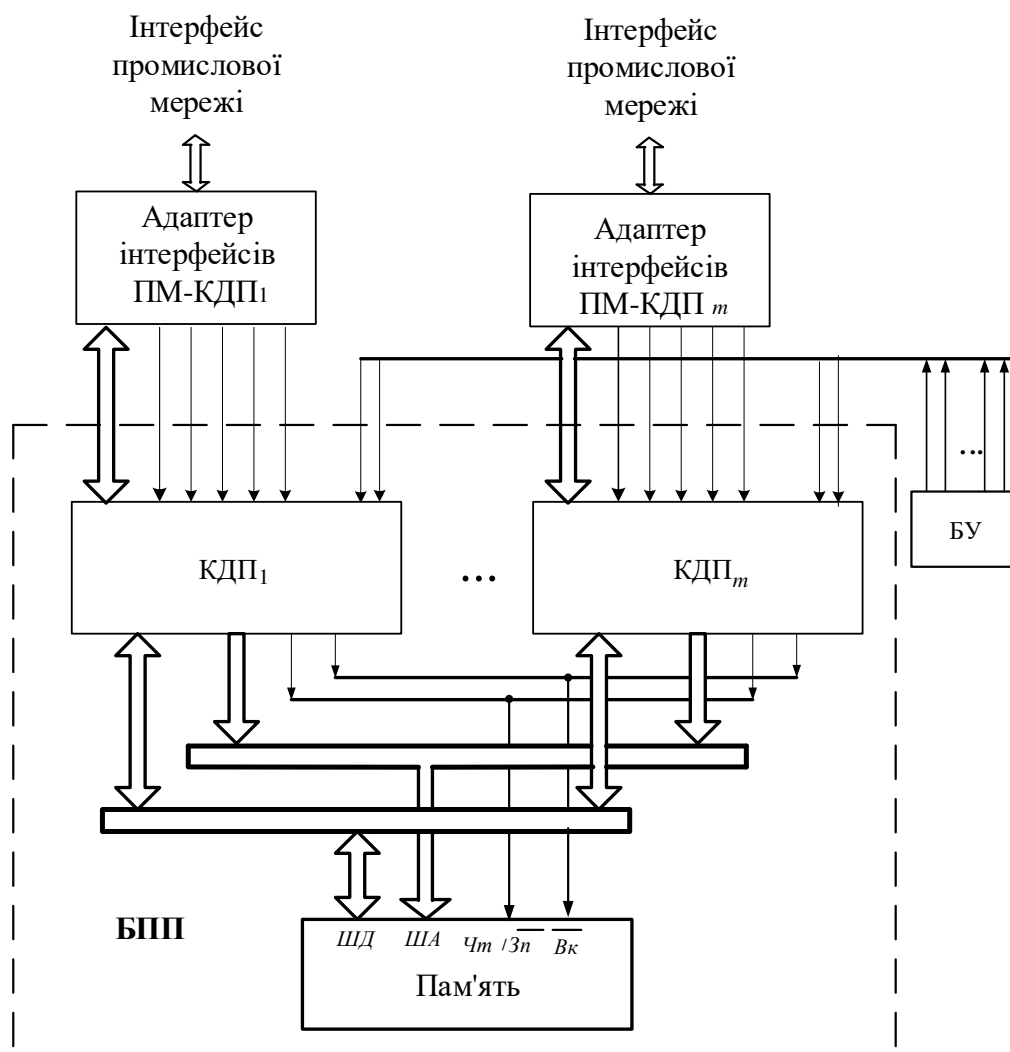


Рисунок 2.4 – Структура модуля збору, обміну та збереження даних

За цим методом кожному  $j$ -у пристрою циклічно з заданим періодом  $T_j$  надається фіксований часовий інтервал доступу до пам'яті. Даний часовий інтервал визначається часом циклу доступу до пам'яті та кількістю зовнішніх пристроїв, які підключаються до МЗОЗД. Мінімальний період звертання зовнішніх пристроїв до МЗОЗД визначається так:

$$T_{\min} = kt_y, \quad (2.36)$$

де  $T_{\min}$  – найменший з періодів звертання зовнішніх пристроїв до МЗОЗД,  $t_y$  – цикл доступу до оперативної пам'яті,  $k$  – кількість зовнішніх пристроїв, що мають доступ до МЗОЗД.

Коли період звертання зовнішніх пристроїв рівний або більший  $T_{\min}$  то забезпечується безконфліктний паралельний обмін через МЗОЗД. Обмін МЗОЗД з зовнішніми пристроями повинен здійснюватися з використанням інтерфейсів на основі технології польової шини. Використання таких інтерфейсів вимагає послідовно-паралельного та паралельно-послідовних перетворень при обміні з МЗОЗД. У свою чергу час послідовно-паралельного перетворення визначає мінімальний період  $T_{\min}$  звертання зовнішнього пристрою до пам'яті МЗОЗД. Такий час обчислюється так:

$$T_{\min} = (n + y)T_{di}, \quad (2.37)$$

де  $n$  – кількість розрядів даних,  $y$  – кількість розрядів допоміжної інформації,  $T_{di}$  – період надходження  $i$ -х розрядів даних ( $i=1, \dots, n$ ) і допоміжної інформації в промисловій мережі.

При виборі пам'яті, яка використовується для розробки МЗОЗД, її визначається за таким виразом:

$$t_y \leq \frac{T_{\min}}{k}, \quad (2.38)$$

де  $t_y$  – цикл доступу до оперативної пам'яті.

В дисертаційній роботі пропонується вдосконалити метод часового розподілу ресурсів оперативної пам'яті між зовнішніми пристроями шляхом узгодження інтенсивності надходження даних



$$P_d = kF_{di} \quad (2.39)$$

з інтенсивністю доступу до МЗОЗД

$$P_{\text{МЗОЗТД}} = \frac{kn}{T_{\text{min}}}, \quad (2.40)$$

де  $P_d$  – інтенсивність надходження даних;  $F_{di}$  – частота надходження  $i$ -х розрядів даних;  $k$  – кількість зовнішніх пристроїв;  $P_{\text{МЗОЗТД}}$ , – інтенсивність доступу до МЗОЗД;  $n$  – розрядність даних.

Узгодження інтенсивності надходження даних  $P_d$  з інтенсивністю доступу до МЗОЗД  $P_{\text{МЗОЗТД}}$  забезпечує вибір мінімальної швидкодії для пам'яті, яка забезпечить безконфліктний обмін для  $k$  зовнішніх пристроїв. Оскільки швидкодія пам'яті напряду зв'язана з потужністю споживання, надійністю та вартістю це забезпечує зменшення вартості та потужністю споживання і підвищення надійності роботи МЗОЗД.

Організація зв'язку між зовнішніми пристроями через МЗОЗД здійснюється через поштові скриньки. В пам'яті для кожного зовнішнього пристрою, мікроконтролерної системи та робочої станції відводяться фіксована області пам'яті – поштова скринька стану і поштова скринька повідомлень. Кожний пристрій, що підключений МЗОЗД передає повідомлення в поштову скриньку про свій стан та адресу початкової комірки пам'яті першого елемента масиву даних і його розмір. Перевага зв'язку через поштову скриньку є в тому, що адресати отримують дані без участі передаючого засобу.

Пропонується розробку МЗОЗД здійснювати з використанням інтегрованого підходу, який охоплює [101, 102, 103, 104]: сучасну елементну базу; інтегральну технологію; інтерфейси промислової мережі; паралельні методи та засоби обміну; методи синтезу та базові структури БПП.

Структура МЗОЗД повинна мати змінний склад обладнання, який передбачає наявність ядра компоненти (пам'яті та БУ) та змінних модулів (КДП та адаптерів інтерфейсів ПМ-КДП), за допомогою яких ядро підключається до конкретних зовнішніх пристроїв.

Для синтезу пристрою збереження та обміну необхідно знати: кількість зовнішніх пристроїв  $k$ ; максимальну частоту обміну  $F_{di}$ , яка забезпечується інтерфейсом; обсяг  $N_j$  і розрядність  $n_j$  даних ( $j=1, \dots, k$ ) для кожного зовнішнього пристрою.

Ємність пам'яті  $Q$  МЗОЗД залежить як від кількості зовнішніх пристроїв  $k$ , так від розмірів  $N_j$  розрядності  $n_j$  масивів даних, які використовуються  $j$ -м зовнішнім пристроєм при обміні. Крім того, необхідно передбачити певний обсяг пам'яті для організації обміну у МЗОЗД. Загальна ємність пам'яті  $Q$  МЗОЗД обчислюється за формулою:

$$Q \geq V + \sum_j^k N_j n_j, \quad (2.41)$$

де  $V$  – кількість пам'яті, яка використовується для організації обміну.

Особливістю МЗОЗД є можливість налаштовуватися на роботу з різними за зовнішніми пристроями шляхом формування БУ різних за тривалістю та періодом імпульсів синхронізації. Запис (читання) даних у МЗОЗД може здійснюватися як послівно, так і масивами. Робота з масивами даних вимагає попереднього налаштування генератора адрес у КДП на генерацію необхідної послідовності адрес. Звертання до її пам'яті вимагає попереднього запису адреси в КДП. При послівному звертанні зовнішніх пристроїв до кожного запису або читання вимагає попереднього запису адреси в КДП, а при роботі з масивом даних попередній запис адреси здійснюється один раз на початку звертання до масиву. Попередній запис адреси у КДП супроводжується читанням даних за записаною адресою.

## 2.6 Синтез інтелектуальних компонентів багаторівневих систем управління енергоефективністю підприємства

Одними із шляхів підвищення енергоефективності управління технологічними процесами є використання інтелектуальних компонентів [105]. У БСУЕП інтелектуальні компоненти використовуються для розв'язання таких

задач: відновлення втрачених даних, які надходять із давачів у мовах завад; динамічна фільтрація даних із давачів; компресії та декомпресії технологічних даних; інтелектуалізація регуляторів систем автоматичного управління, включаючи сервоприводи; інтелектуалізація управління виконавчими механізмами та складними об'єктами; інтелектуальний аналіз; системи підтримки прийняття управлінських рішень; розпізнавання зображень і сцен в системах технічного зору; прогнозування руху та автономне управління транспортними засобами; прогнозування, контроль та управління технологічними процесами; оптимізація витрат ресурсів і режимів роботи систем управління технологічними процесами; налаштування параметрів технічних засобів у залежності від умов навколишнього середовища; забезпечення інформаційної безпеки.

Реалізацію інтелектуальних компонентів БСУЕП пропонується здійснювати на базі штучних нейронних мереж [106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113]. При розробці інтелектуальних компонентів на основі використання штучних нейронних мереж задача синтезу зводиться до вибору архітектури нейронної мережі, яка буде відповідати задачі, що розв'язується, виборі алгоритму навчання, формуванні навчальної та тестової вибірок. Наступними кроками є налаштування та навчання штучних нейронних мереж, що в більшості випадків зводиться до визначення параметрів нейронної мережі і (вагових коефіцієнтів, міжнейронних зв'язків та величин зміщень активаційних функцій нейронних елементів) з використанням навчальної вибірки та особливостей задачі. Метою налаштування нейромережі є визначення її параметрів – кількості шарів нейронних елементів і кількість нейронів у кожному шарі. Для здійснення налаштування тренувальну вибірку даних розділяють на три підмножини: навчальну, валідаційну та тестову. Сам процес налаштування параметрів нейромережі виконується шляхом багаторазового навчання. Оцінка якості і вибір найкращого варіанту структури здійснюється на підставі даних валідаційної вибірки. Остаточна перевірка якості налагодження і навчання здійснюється за допомогою тестової вибірки даних. Критерієм вибору

оптимальної структури є критерій моделі оптимальної складності. Деякі нейромережі, зокрема одношарові перцептрони, не передбачають виконання процедури налаштування, так як їх структура визначається структурою векторів даних. Від якості налаштування та навчання нейромереж напряду залежить ефективність розв'язання задач.

Навчання нейромереж може виконуватися як ітераційним, так неітераційним методом. Ітераційний процес навчання є покроковим, при якому на вхід нейромережі кожен раз подаються нові значення векторів-зразків. Навчання може виконуватися як у режимі з супервізором, так і без супервізора (самонавчання). При використанні навчання в режимі з супервізором вимагається наявність у векторах зразків вихідних компонентів, тобто відомих відгуків. Навчання в режимі без супервізора не передбачає розділення векторів на вхідні і вихідні компоненти. Основними характеристиками навчання нейромережі є якість підбору вагових коефіцієнтів і час навчання. Дані характеристики є взаємно пов'язаними та їх вибір здійснюється на основі вимог, що впливають з постановки задачі. Порівняння ітераційних методів навчання нейромереж здійснюються за кількістю кроків необхідних для отримання коректного рішення та кількістю необхідних додаткових змінних для організації обчислювального процесу. При цьому кращими ітераційними методами навчання є ті, що виконують навчання за меншу кількість кроків з меншою кількістю додаткових змінних.

Для синтезу інтелектуальних компонентів БСУЕП [114] перспективними є нейромережі з неітераційним підходом до навчання із застосування парадигми «модель послідовних геометричних перетворень» (МПП), запропонованої і розробленої Р. О. Ткаченком. В основі парадигми МПП лежить неітераційний підхід до навчання нейромережі, який передбачає пряме обчислення вагових коефіцієнтів під час поступового зменшення розмірності простору вхідних багатовимірних даних на нейронах прихованого шару. З використанням парадигми МПП розробляються нейроподібні мережі, які орієнтовані на реалізацію конкретної задачі. Основними перевагами нейроподібних мереж є

висока швидкодія, яка досягається за рахунок розпаралелення опрацювання даних та використання наперед обчислених вагових коефіцієнтів.

Основними компонентами, на базі яких синтезуються нейроподібні системи є нейроелементи, в яких вагові коефіцієнти  $W_j$  попередньо обчислюються і не змінюються або дуже рідко змінюються у процесі роботи. У загальному випадку нейроелемент здійснює перетворення у відповідності з формулою:

$$Y = f\left(\sum_{j=1}^N W_j X_j\right), \quad (2.42)$$

де  $Y$  – вихідний сигнал нейроелемента,  $f$  – функція активації,  $N$  – кількість входів.

З формули (2.42) випливає, що опрацювання даних у нейроелементі зводиться до операції обчислення скалярного добутку та функції активації  $f$ . Значна частина інтелектуальних компонентів синтезуються на базі мікроконтролерів (мікропроцесорів), операційним базисом яких є прості арифметичні операції (додавання, віднімання, інверсія та зсуви). У таких інтелектуальних компонентах для обчислення скалярного добутку використовують алгоритми множення з прямим формуванням часткових добутків, оскільки вони є регулярними та добре структурованими. Найуживанішими з них є алгоритми множення з аналізом одного розряду. Множення двійкових чисел з аналізом одного розряду множника записується так:

$$C_j = W_j X_j = \sum_{i=0}^{n-1} 2^{-i} W_j x_i = \sum_{i=0}^{n-1} 2^{-i} P_{ji}, \quad (2.43)$$

де  $n$  – розрядність множника;  $x_i$  – значення  $i$ -го розряду множника;  $P_{ji}$  –  $i$ -й частковий добуток.

Операція множення за таким алгоритмом виконується за  $n$  кроків, кожний з яких зводиться до формування та накопичення часткових добутків відповідно до таких формул:

$$P_{ji} = W_j x_{ji}, \quad (2.44)$$

$$C_{ji} = 2^{-1} C_{j(i-1)} + P_{ji}, \quad (2.45)$$

$C_{ji}$  – сума накопичених часткових добутків,  $C_0=0$ .

Для обчислення скалярного добутку  $Z = \sum_{j=1}^N W_j X_j$  з використанням алгоритмів множення (2.44 і 2.45) необхідно виконати  $N$  операцій множень і  $N-1$  додавань. Зменшити час отримання скалярного добутку можна шляхом використання багатооперандного підходу та вертикальної моделі обчислення. При використанні багатооперандного підходу та вертикальної моделі обчислення процес обчислення скалярного добутку розглядається як виконання єдиної операції над операндами, які надходять послідовно розрядними зрізами. Реалізація такого обчислення вимагає формування для кожного розрядного зрізу макрочасткового добутку  $P_{Mi}$ . Обчислення скалярного добутку з формуванням макрочасткового добутку  $P_{Mi}$  реалізується за такими формулами:

$$Z = \sum_{j=1}^N W_j X_j = \sum_{i=0}^{n-1} 2^{-i} P_{Mi}, \quad (2.46)$$

де

$$P_{Mi} = \sum_{j=1}^N W_j x_{ji} = \sum_{j=1}^N P_{ji}. \quad (2.47)$$

У нейроподібних системах вагові коефіцієнти  $W_j$  попередньо обчислюються, тобто їх можна вважати константами. Для обчислення скалярного добутку вдосконалимо вертикальний таблично-алгоритмічний метод обчислення, який передбачає обчислення та зберігання у пам'яті макрочасткових добутків  $P_{Mi}$  з наступним їх підсумовуванням. Обчислення значень макрочасткових добутків  $P_{Mi}$  здійснюється за такою формулою:

$$P_{Mi} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } x_{1i} = x_{2i} = x_{3i} = \dots = x_{Ni} = 0 \\ W_1, & \text{якщо } x_{1i} = 1, x_{2i} = x_{3i} = \dots = x_{Ni} = 0 \\ W_2, & \text{якщо } x_{1i} = 0, x_{2i} = 1, x_{3i} = \dots = x_{Ni} = 0 \\ W_1 + W_2, & \text{якщо } x_{1i} = 1, x_{2i} = 1, x_{3i} = \dots = x_{Ni} = 0 \\ \vdots & \\ W_2 + \dots + W_N, & \dots \text{якщо } x_{1i} = 0, x_{2i} = x_{3i} = \dots = x_{Ni} = 1 \\ W_1 + W_2 + \dots + W_N, & \text{якщо } x_{1i} = x_{2i} = x_{3i} = \dots = x_{Ni} = 1 \end{cases} \quad (2.48)$$

Обчислені значення  $P_{Mi}$  зберігаються у пам'яті за адресою, яка є комбінацією значень розрядних зрізів  $N$  множників  $x_{ji}$ . Структура таблиці пам'яті для зберігання макрочасткових добутків  $P_{Mi}$  наведена на рис. 2.5.

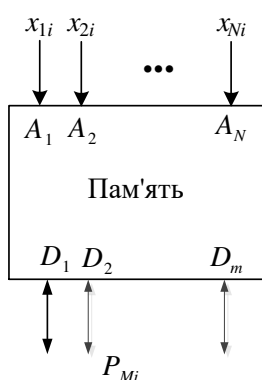


Рисунок 2.5 – Структура таблиці пам'яті для зберігання макрочасткових добутків

Обсяг пам'яті для зберігання макрочасткових добутоків  $P_{Mi}$  визначається за формулою  $Q = 2^N \times m$ , де  $m$  - розрядність макрочасткових добутоків  $P_{Mi}$ . У кожному такті роботи з пам'яті за адресою, яка є розрядним зрізом множників  $x_{ji}$ , зчитується макрочастковий добуток  $P_{Mi}$ , який підсумовується у відповідності з формулою (2.46).

Обчислення скалярного добутку за таблично-алгоритмічним методом виконується за  $n$  ітерацій. Зменшення часу обчислення скалярного добутку за даним методом можна досягти розпаралеленням процесу обчислення шляхом використання двох і більше таблиць пам'яті. Вдосконалений таблично-алгоритмічний метод з використанням двох таблиць пам'яті для обчислення скалярного добутку запишеться так:

$$Z = \sum_{j=1}^N W_j X_j = \sum_{k=0}^{\frac{n-1}{2}} 2^{-k} P_{Mk} + 2^{-n/2} \sum_{g=n/2}^{n-1} 2^{-(g-n/2)} P_{Mg}. \quad (2.49)$$

Обчислення скалярного добутку за даним методом виконується за  $n/2$  ітерацій [115]. Вдосконалений таблично-алгоритмічний метод обчислення скалярного добутку орієнтований на багатоядерні мікропроцесори.

## 2.7 Висновки до розділу 2

1. Розроблено метод вибору комплектуючих засобів інформаційної технології багаторівневого управління енергоефективністю підприємства, який за рахунок врахування обмежень, вимог технічного завдання та використанню інтегрального критерію забезпечує синтез засобів багаторівневих систем з високими техніко-економічними показниками.

2. Розроблено метод синтезу засобів інформаційної технології багаторівневого управління енергоефективністю підприємства, який, на відміну



від існуючих, за рахунок врахування інтерфейсів зв'язку базових складових та їх параметрів забезпечує зменшення апаратно-часових затрат.

3. Розроблено засоби автоматизованого синтезу складових інформаційної технології багаторівневої системи управління підприємством, які дають змогу зменшити час пошуку рішень з високими техніко-економічними показниками, що відповідають технічному завданню.

4. Розроблено інформаційну модель структур синтезованих складових БСУЕП, яка базується на використанні теорії графів та кортежів і дає змогу формалізувати базову структуру та модифікувати її в процесі вдосконалення.

5. Вдосконалено метод безконфліктного обміну технологічними даними, який за рахунок узгодження інтенсивності надходження даних з інтенсивністю доступу до засобів обміну забезпечує визначення мінімальної швидкодії пам'яті для синтезу засобів обміну в реальному часі з високими техніко-економічними показниками.

6. Розроблено пристрій збереження та обміну в БСУЕП з промисловою мережею, в якому завдяки використанню методу часового розподілу ресурсів пам'яті, забезпечено безконфліктний обмін даними у реальному часі та збільшено множину зовнішніх пристроїв, що реалізують режим звертання багатьох до багатьох.

7. Вдосконалено метод обчислення сигналу постсинаптичного збудження нейронних елементів в штучних нейронних мережах, який ґрунтується на паралельному таблично-алгоритмічному обчисленні скалярного добутку з використанням двох і більше таблиць та забезпечує зменшення часу опрацювання даних.

### РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ ПІДПРИЄМСТВА

Розроблено базову архітектуру, алгоритми функціонування та моделі аналізу динаміки функціонування системи управління енергоефективністю підприємства.

#### 3.1 Розроблення базової архітектури багаторівневої системи управління енергоефективністю підприємства

Управління енергоефективністю підприємств на рівні технологічних процесів [116] вимагає широке використання Smart-технологій та створення єдиного інформаційного простору з достовірною, повною та оперативною інформацією про протікання технологічних процесів на підприємстві. Одним із шляхів зменшення обсягів інформації є наближення засобів опрацювання (мікроконтролерних систем) до джерел надходження інформації (давачів) та виконавчих механізмів. Накопичені дані опрацьовуються з використанням технологій обчислювального інтелекту. Отриманні результати використовуються для формування ефективних управлінських рішень. Підвищити рівень управління енергоефективністю технологічних процесів на підприємстві можна шляхом розроблення БСУЕП, яка інтегрує функції моніторингу та управління в єдину систему. Така система повинна стати зручним інструментом для підтримки прийняття управлінських рішень на всіх рівнях управління. При використанні такої системи оператори безпосередньо концентруються на управлінні енергоефективністю технологічних процесів.

Для управління енергоефективністю технологічних процесів на підприємстві розроблена базова архітектура БСУЕП [117], яка наведена на рис.3.1, де ПК – персональний комп'ютер; ОК – одноплатні комп'ютери; ПЛК – програмований логічний контролер; МК – мікроконтролер; ВМ – виконавчий

механізм, SCADA – диспетчерське управління та збір даних, DCS – розподілена система керування.

Отже, розроблена базова архітектура БСУЕП складається з трьох рівнів:

- 1-й рівень - збору даних та управління виконавчими механізмами;
- 2-й рівень - контролю та управління технологічними процесами;
- 3-й рівень - операторського контролю та формування управлінських рішень.

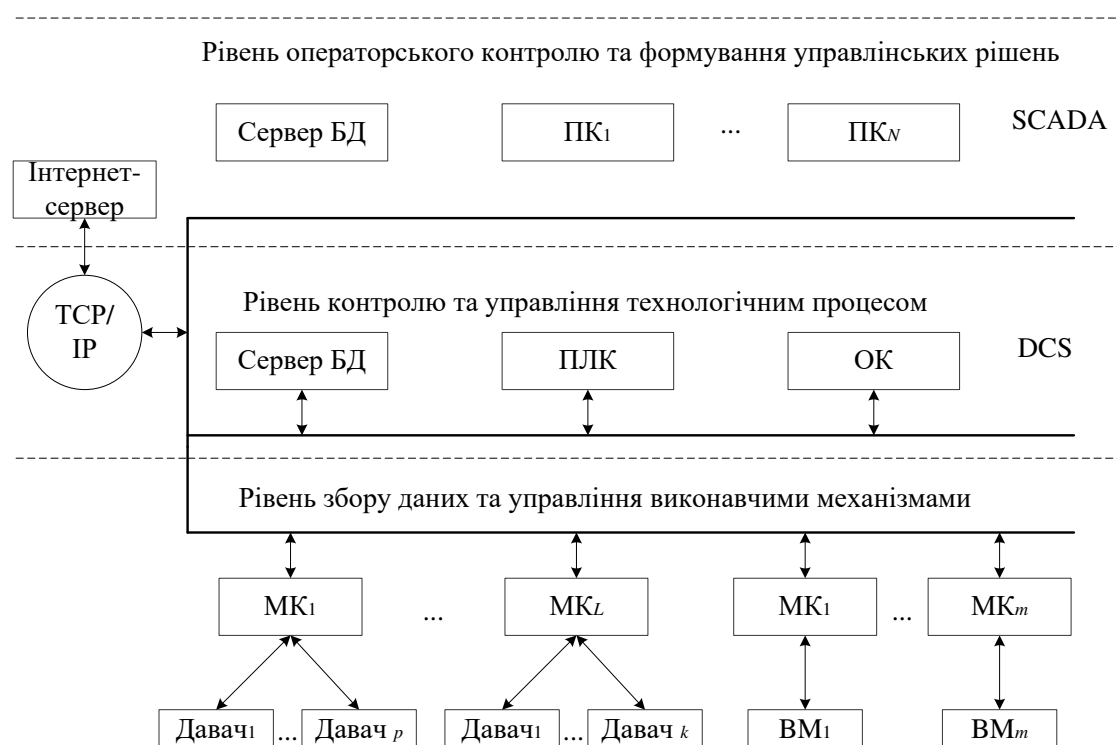


Рисунок 3.1 – Базова архітектура БСУЕП

На кожному ієрархічному рівні управління розв’язуються задачі відповідного рівня складності.

Особливістю розробленої архітектури БСУЕП є змінний склад обладнання, який передбачає присутність постійного ядра та змінних модулів, які підключаються до ядра в залежності від вимог конкретного застосування.

Ядром розробленої структури БСУЕП є інтернет-сервер, сервери баз даних другого і третього рівнів управління та засоби зв'язку. Змінними модулями для першого рівня управління є: давачі, виконавчі механізми та мікроконтролерні системи. Для другого рівня змінними модулями є: ПЛК та ОК, а для третього – ПК. Змінний склад обладнання БСУЕП забезпечує її адаптацію до конкретних технологічних процесів.

Необхідно мати на увазі, що підприємства, побудовані за останні роки, вже оснащені засобами збору технологічної інформації, а підбір та інтеграція систем збору технологічних даних здійснюється вже на етапі проектування. У цьому випадку, для розв'язання задач БСУЕП використовуються штатні засоби вказаних систем.

Більш складна ситуація спостерігається на підприємствах, що вже функціонують. На вказаних підприємствах, особливо на підприємствах малого та середнього бізнесу, як правило, не планувалося розгортання систем збору та обробки інформації внаслідок високої їх вартості у минулому. Проведений аналіз типових виробничих технологічних процесів діючого виробництва дає можливість сформулювати низку особливостей, які необхідно враховувати при створенні БСУЕП:

- для моніторингу параметрів технологічного процесу бажано застосовувати технології, що забезпечують оперативність та простоту розгортання;
- кількість точок вимірювання параметрів може змінюватися, а отже, система повинна мати відкриту архітектуру з можливістю масштабування;
- апаратна частина системи повинна розроблятися на основі сучасних типових рішень для забезпечення простоти та низької вартості;
- необхідне широке застосування базових телекомунікаційних протоколів.

Для попереднього опрацювання даних із давачів і управління виконавчими механізмами, доцільно використовувати максимально прості

апаратні засоби, виконані у вигляді готових промислових компонентів. Для створення цього рівня БСУЕП сьогодні слід зупинити увагу на однокристальних мікроконтролерах, система на кристалі (SoC) та програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС).

Клас однокристальних мікроконтролерів, на базі яких виготовляються доступні модулі для створення широкого кола систем, представлений сьогодні засобами фірм ST Microelectronics, Atmel, STCmicro, Microchip, TI та інших. Це, як правило, 8 бітні програмовані мікроконтролери з архітектурою RISC або CISC і тактовою частотою у десятки МГц, вбудованим ОЗП, Flash-пам'яттю, Еeprom та периферією, що підтримує інтерфейси UART, SPI, CAN, I2C. Обсяг вбудованої пам'яті для зберігання даних та програм невеликий, і забезпечує реалізацію простих функцій вимірювання, передачі даних по відповідному інтерфейсу та елементарного керування. До переваг цих мікроконтролерів слід віднести, в першу чергу, низьку вартість готових промислових модулів на їх основі, відлагоджувальних плат, програматорів та відладчиків.

Останнім часом, на ринку з'явилися 32 бітні мікроконтролери та готові модулі на їх основі, наприклад, на основі ARM архітектури компанії ST Microelectronics [118]. Тактова частота у сотні МГц, ОЗП біля сотень кБ, вбудована Flash-пам'ять та інтерфейси UART, SPI, I2C, CAN забезпечують створення засобів збору даних та управління, що забезпечують реалізацію достатньо складних алгоритмів обробки. З практичної точки зору, при використанні таких засобів, в першу чергу слід звернути увагу на єдиний адресний простір, в якому розміщено Flash-пам'ять, ОЗУ, Еeprom, а також регістри периферії. Це істотно спрощує написання коду, а коди різних стеків і бібліотек легко перетворюються, оскільки, в основному, розраховані на архітектуру фон Неймана (в сенсі адресного простору). При цьому, шини для доступу до різних типів пам'яті розділені, що вказує на наявність Гарвардської архітектури [119].

Розглянуті 8 і 32 бітні мікроконтролери забезпечують легку інтеграцію у систему різноманітних датчиків і засобів керування, оскільки містять основні промислові інтерфейси.

Для розроблення мікропрограм, як правило, застосовують мови C, C++ та асемблер. Для ряду мікроконтролерів розроблені безкоштовні бібліотеки драйверів периферії та програмний фреймворк (software framework), що забезпечує суттєве полегшення створення програмного забезпечення.

Останнім часом, засоби передачі даних на підприємствах створюють на основі технологій Ethernet та Wi-Fi, що обумовлене доступністю та широкою номенклатурою кабельних систем, активного і пасивного мережевого обладнання. Технологія безпроводних мереж Wi-Fi є найбільш зручною в умовах виробництва, коли ставляться вимоги мобільності, простоти установки і використання (звичайно, за умови врахування електромагнітної сумісності з наявним технологічним обладнанням і при відсутності завад з його сторони та впливу на функціонування мережі). Перевагами є гнучкість архітектури мережі з можливістю динамічної зміни топології мережі, швидкість проектування і реалізації, що критично при жорстких вимогах до тривалості побудови мережі, відсутність потреби у розводці та прокладанні кабелів, підтримка стеку телекомунікаційних протоколів TCP/IP.

Для передачі даних по безпроводній мережі необхідний спеціальний радіомодем для забезпечення функціонування фізичного та каналного рівнів моделі OSI у безпроводній мережі, а для підтримки старших рівнів моделі OSI – від мікропроцесора висока продуктивність. Сьогодні випускаються спеціалізовані пристрої – модулі RS232-Wi-Fi, однак, їх вартість може бути порівнюваною з вартістю основної мікроконтролерної системи [120].

Однак, впродовж останніх років з'явився новий клас спеціалізованих мікроконтролерів, що забезпечують повну підтримку Wi-Fi і стеку протоколів TCP/IP. Крім того, на кристалі розміщується доволі потужний процесор, ОЗП та доволі розвинута периферія з підтримкою протоколів SPI, I2C та UART. На основі такого пристрою можна створити повноцінний безпроводний пристрій,

який зможе отримати дані з давача, здійснити попередню обробку та передати отриману інформацію за допомогою телекомунікаційних протоколів на локальний або віддалений сервер. Такі засоби дали новий поштовх розвитку технології інтернету речей. Крім того, на основі вказаних спеціалізованих мікроконтролерів вже пропонуються готові промислові модулі, що можуть знайти застосування при реалізації завдань нижнього рівня БСУЕП. Серед таких засобів слід вказати мікроконтролер NL6621 фірми Nufont [121], RTL8710 фірми Realtek [122], ESP8266 фірми Espressif [123]. Для прикладу ESP8266 забезпечує повну підтримку функцій Wi-Fi (режим хоста та точки доступу з забезпеченням протоколів аутентифікації WEP та WPA/WPA2) та стеку протоколів TCP/IP. ESP8266 має вбудований 32 бітний RISC процесор Tensilica Xtensa LX106 з тактовою частотою 80 МГц, 64 кБ ОЗП команд та 96 кБ ОЗП даних, підтримує зовнішню Flash-пам'ять зберігання мікропрограм від 512 кБ до 16 МБ. Чіп забезпечує підтримку інтерфейсів UART, SPI, I2C та містить одноканальний 10 бітний АЦП.

Для створення програм доступний програмний фреймворк, бібліотеки підтримки широкого кола давачів. Для розробки можна застосовувати мову C, у деяких випадках розробка спрощується внаслідок використання інтерпретатора мови LUA.

Для реалізації на нижньому рівні складніших алгоритмів опрацювання даних можна застосувати одноплатні комп'ютери на основі спеціалізованих процесорів SoC. Одноплатний мікрокомп'ютер є перспективною платформою для систем автоматизації, що має та відкриту архітектуру, низьку ціну і використовує операційну систему Linux. Один з перших, у цьому класі, мікрокомп'ютер Raspberry Pi з'явився у 2012 році і побудований на системі (SoC) Broadcom BCM2835, яка включає в себе процесор ARM із тактовою частотою 700 МГц, графічний процесор VideoCore IV, і 512 або 256 МБ оперативної пам'яті, в якості додаткової пам'яті використовується SD картка [124]. Мікрокомп'ютер випускається у декількох версіях: молодша (A) (700МГц тактова частота, 256 МБ ОЗП, один USB порт), старша (B) (до 1,2 ГГц тактова

частота, з Ethernet, до 1 ГБ ОЗП, до 4 USB портів), останнім часом з'явилася дешева версія – Zero (до 1 ГГц тактова частота, 512 МБ ОЗП, один мікроUSB порт). Raspberry Pi має порти GPIO, підтримку інтерфейсів UART, SPI, I2C, які можна задіяти для під'єднання датчиків та керування.

Останнім часом перелік одноплатних комп'ютерів на SoC значно розширився, це, наприклад, BeagleBone Black на процесорі AM3359 ARM Cortex-A8 фірми Texas Instruments [125]; Intel Edison на процесорі Intel Atom [126]; pcDuino на процесорі ARM A10 фірми AllWinner [127]; Cubieboard2 A20 на процесорі ARM A20 [128], цілу лінійку OrangePI на процесорі H3, H2+ фірми AllWinner [129]. Всі ці одноплатні комп'ютери мають розвинену периферію, до них можна підключити різноманітні датчики та забезпечити роботу у безпроводній мережі.

З точки зору розробки – це повноцінні Linux системи. Для реалізації алгоритмів, застосовують мови C, C++, Python, інколи – асемблер. Проблемою може стати відсутність програмного фреймворка для конкретного одноплатного комп'ютера, однак, допомогти у вирішенні може проект Armbian [130], що займається розробкою дистрибутивів на базі Debian для SoC на основі ARM, а кожен комп'ютер вже містить встановлені і готові до використання засоби розробки.

Для безпосереднього управління виконавчими механізмами використовуються програмні засоби DCS та PLC.

На цьому рівні БСУЕП для розв'язання задач, що потребують високої потокової продуктивності доцільно застосовувати ПЛІС у вигляді готових промислових модулів FPGA/CPLD фірми Altera – MAXII EPM240, Altera Cyclone II EP2C5T144, Altera Cyclone IV EP4CE6 [131], фірми Xilinx – CoolRunner-II FPGA CPLD XC2C64A, FPGA Spartan-3E XC3S250E [132] та інші, більш продуктивні. Розробка для ПЛІС початкового рівня може здійснюватися за допомогою безкоштовних версій програмних засобів.

Рівень контролю та управління технологічним процесом. Цей рівень на управління передбачається як достатньо автономний, який при відсутності



зв'язку з верхнім рівнем – здатний тривалий час, без втрати інформації, працювати автономно. На даному рівні можуть використовуватися як одноплатні комп'ютери на основі SoC, розглянуті вище, так і, наприклад, програмовані логічні контролери Mitsubishi Melsec FX3U, а також, стандартні засоби візуального контролю та управління технологічним процесом.

Програмовані контролери Mitsubishi FX3U є найпотужнішими і високопродуктивними в лінійці контролерів MELSECFX (FX1S, FX3S, FX1N, FX3G). Архітектура контролера є двошинною, що збільшує його можливості. Програмований контролер Mitsubishi забезпечує підключення як розширювальних модулів попереднього покоління, так і модулів нового покоління серії FX3U. При підключенні модулів FX3U контролер автоматично перемикає свою комутаційну шину на високошвидкісний режим і обмін даними відбувається на підвищеній швидкості. Модулі FX0N, FX2N працюють з контролером на звичайних швидкостях. Таким чином, використання розширювальних модулів забезпечує збільшення кількості входів/виходів до 256 (при прямій адресації), а через станції децентралізованого введення/виведення до 384.

Крім того, програмований контролер Mitsubishi забезпечує підключення високошвидкісних адаптерних модулів FX3U-XXX-ADP, які розширюють можливості контролера при роботі з аналоговими сигналами та збільшують кількість додаткових комунікаційних інтерфейсів (RS232 / 422/485) [133].

На рівні операторського контролю та формування управлінських рішень використовують автоматизоване робоче місце оператора, який виконує контроль та приймає рішення щодо ефективності функціонування системи. Використовуються робочі станції оператора на RISC- або Intel-платформах та промислові комп'ютери такі як Mitsubishi Electric, BECKHOFF, Eaton, АХІОМТЕК, які відповідають промисловим умовам експлуатації з підвищеними вимогами до міцності та надійності. Задачі цього рівня такі: збір даних з периферійних контролерів і мікроконтролерних систем; збереження даних; опрацювання даних; опрацювання відео-потоків, розпізнавання

зображень і сцен в системах технічного зору; синхронізація роботи розподілених підсистем; візуалізація та відображення ходу виконання технологічного процесу; формування управлінських рішень.

Розв'язання широкого кола задач, на цьому рівні, реалізується з допомогою системи SCADA.

Особливостями задач, які розв'язуються на рівні операторського контролю та формування управлінських рішень є: великий обсяг і різноманітність даних; суперечливість та неповнота даних; постійність і висока інтенсивність надходження вхідних даних; великий обсяг обчислень з переважанням обчислювальних операцій над логічними при опрацюванні відео-потоків, розпізнавання зображень і сцен в системах технічного зору; постійне ускладнення алгоритмів опрацювання та підвищення вимог до точності результатів; можливість розпаралелення опрацювання даних як у часі, так і у просторі.

Зважаючи на широкий розвиток та впровадження безпроводних засобів обміну даними та зростаюча інтеграція різноманітних систем з Інтернет, останніми роками постає задача створення універсальних платформ, які б підтримували як функції забезпечення гарантованого обміну даними з периферійними пристроями, так і функції створення універсальних захищених сховищ даних, доступних, відповідно до наданих повноважень, у будь-якій точці світу. Таким чином, при реалізації БСУЕП постає ще одна задача (рівень) – формування інтегрованої системи обміну та накопичення інформації з розосереджених систем.

При цьому, метою такої системи є забезпечення об'єднання між собою давачів, мікроконтролерних систем і виконавчих механізмів провідними, безпроводними каналами, та організація взаємодія з Інтернет. Для цього може використовуватися відкрита платформа обміну даними Device Hive. Ця технологія гнучка, масштабована та проста в застосуванні і забезпечує обмін даними між апаратними компонентами за принципом M2M. Застосування технології Device Hive забезпечує формування комунікаційного середовища,

програмний контроль і використання мультиплатформових бібліотек для розроблення засобів віддаленого управління та моніторингу, телеметрії, дистанційного управління та контролю. З технологією Device Hive можна працювати використовуючи широкий спектр технологій, наприклад “embedded Linux”, Python, бібліотеки C++, протокол JSON, або підключати AVR, Microchip мікроконтролери. Особливістю роботи з Device Hive є організація, в першу чергу, доступу до мережі, а потім – програмування конкретних застосувань, що зменшує час на проектування способів передачі даних.

### 3.2 Розробка алгоритмів функціонування багаторівневої системи управління енергоефективністю підприємства

Розроблена БСУЕП на підприємстві є ієрархічною тривірневою структурою. Математично, складові кожного рівня БСУЕП, можна описати з використанням теорії множин [134].

На першому рівні збору даних та управління виконавчими механізмами збір технологічних даних здійснюється за допомогою множини давачів:  $D = (S_1, S_e, \dots, S_n)$ , де:  $S_1$  – перший давач,  $n$  – кількість давачів.

На першому рівні відбувається безпосереднє управління з використанням виконавчих механізмів (актюаторів). Відповідно, множину цих пристроїв опишемо з використанням наступного виразу:  $V = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ , де  $a_1$  – перший актюатор;  $m$  – кількість виконавчих механізмів (актюаторів).

Окрім того, даний рівень включає спеціальні засоби (пристрої попереднього опрацювання даних, пристрої зв'язку, приймання та передавання даних, тощо), то введемо множину спеціальних пристроїв:  $C = (P_1, P_2, \dots, P_k)$ , де  $P_1$  – перший спеціальний засіб;  $k$  – кількість спеціальних засобів.

Другий рівень – управління технологічними процесами (ТП), можна описати з використанням наступного виразу:

$$S_{tr\_3} = (D, V, C, Z_{V\_1}), \quad (3.1)$$

де:  $Z_{V_1}$  – матриця інцидентності, яка відображає зв'язки між елементами множин  $D$ ,  $V$  та  $C$ . Вираз (3.1) відображає тільки технічні засоби, тому до даного виразу додаємо підмножину програмних засобів:  $S_{tr_3} = (D, V, C, Z_{V_1}, P_{r_3})$ ,  $P_{r_3} = (p_{r1}, p_{r2}, \dots, p_{rl})$ , де  $p_{r1}$  – 1-й програмний засіб;  $l$  – кількість програмних засобів на 3-му рівні ієрархії системи управління енергоефективністю регіону.

На третьому рівні управління (операторський контролю та формування управлінських рішень) відбувається інтеграція технологічних даних як від першого, так і другого рівнів. Накопичені технологічні дані опрацьовуються та на базі результатів опрацювання формуються управлінські рішення. Цей рівень включає власні елементи та описується так:

$$S_{tr_2} = (C_{Str_1}, Z_{v_2}, P_{r_2}, Str_{3_k}), \quad (3.2)$$

де:  $C_{Str_2}$  – матриця спеціалізованих пристроїв 2-го рівня;  $P_{r_2}$  – матриця програмних засобів 2-го рівня,  $Z_{v_2}$  – матриця зв'язків між елементами матриці  $C_{Str_2}$ ,  $Str_{3_k}$  – матриця складових (елементів) третього рівня,  $k$  – кількість елементів 3-го рівня.

Роботу БСУЕП можна описати алгоритми функціонування кожного із рівнів системи. Зокрема, система на першому рівні реалізує наступні функції: збір даних з давачів; вплив на стан актюаторів; автономна робота; комунікація з вищими рівнями; виконання команд вищого рівня; попереднє опрацювання даних та ін.

Зазвичай елементи першого рівня є однопоточними та виконують основну програму у безкінечному циклі. Основними завданнями першого рівня БСУЕП є виконання команд із ззовні та виконання внутрішньої логіки. Для цього необхідно враховувати можливість перемикання між основними командами.

Саме тому розроблений алгоритм роботи включає в себе ці особливості, а саме циклічне опитування наявності вхідних команд та їх виконання або виконання внутрішнього циклу роботи системи.

Крок 1: Під час запуску системи відбувається ініціалізація системи, яка включає в себе зчитування конфігурації роботи, ініціалізацію портів, ініціалізацію каналів зв'язку, тощо.

Крок 2: Після ініціалізації системи, відбувається сканування вхідних каналів зв'язку на факту отримання зовнішніх команд. У випадку, якщо отримано вхідну команду, необхідно перейти на крок 10. Якщо жодної вхідної команди не отримано, то перехід на крок 3.

Крок 3: необхідно, щоб пристрій виконував команди згідно із внутрішньою логікою роботи системи. Для аналізу стану середовища необхідно послідовно опитати стан і виміри від давачів.

Крок 4: На основі отриманих даних від давачів відбувається їхній попередній аналіз та трансформація, яка може включати в себе нормалізацію, масштабування та інші нескладні маніпуляції.

Крок 5: Необхідно верифікувати зміни у стані середовища, для цього виконується порівняння із попередніми записаними значеннями стану системи. У випадку, якщо виявлено зміни у стані системи – перехід на крок 6. Якщо відсутні зміни – перехід на крок 7.

Крок 6: Необхідно повідомити вищі рівні про зміну у стані системи. Для цього формується вхідне повідомлення та надсилається до рівня ТП.

Крок 7: Оскільки елементи 1-го рівня здатні виконувати нескладну логіку та працювати у якості автомата, то необхідно перевірити відповідність між внутрішніми сценаріями роботи системи та поточним станом системи. У випадку, якщо необхідно змінити стан актюатора необхідно перейти на крок 8, у протилежному варіанті перехід на крок 2.

Крок 8: Надіслати керуючі сигнали для зміни стану актюаторів згідно із внутрішніми сценаріями роботи.

Крок 9: Надіслати звіт до ТП про зміни у стані актюаторів, перехід на крок 2.

Крок 10: Після отримання вхідної команди, необхідно перевірити та проаналізувати отриману стрічку. Також потрібно отримати тип команди та допоміжні параметри команди.

Крок 11: У випадку, якщо дана команда передбачає отримання даних про стан давача, необхідно перейти на крок 12. У протилежному випадку перехід на крок 14.

Крок 12: Необхідно зчитати стан і поточні результати у давача, який є описаний у команді.

Крок 13: Провести попередній аналіз та трансформації даних від давача, перехід на крок 17.

Крок 14: У випадку, якщо дана команда передбачає зміну стану актюатора, то необхідно перейти на крок 15. У протилежному випадку перехід на крок 16.

Крок 15: Надіслати керуючі сигнали для зміни стану актюаторів, який є описаний у вхідній команді. Перехід на крок 17.

Крок 16: Виконати іншу сторонню команду, згідно із розширеними протоколами зв'язку.

Крок 17: Сформувати та надіслати звіт про виконання вхідної команди, перехід на крок 2.

Блок-схема алгоритму роботи 1-го рівня БСУЕП наведено в Додатку А.

На другому рівні система повинна виконувати такі функції: збереження даних про поточний стан системи ТП; аналіз вхідних даних від нижчого рівня; перевірка стану системи ТП; формування керуючих команд для стабілізації стану ТП; передавання та опитування пристроїв нижчого рівня; контроль зв'язку елементами нижчого рівня та комунікація з елементами нижчого рівня.

На другому рівні проектування можна реалізувати складнішу логіку, яка може в себе включати виконання періодичних завдань, багатопоточність та складнішу комунікацію між рівнями.

Крок 1: Під час запуску системи відбувається ініціалізація системи, яка включає в себе зчитування конфігурації роботи, ініціалізацію портів, ініціалізацію каналів зв'язку, ініціалізацію ядра системи.

Крок 2: Після ініціалізації системи, відбувається сканування вхідних каналів зв'язку на факт отримання зовнішніх команд. У випадку, якщо отримано вхідну команду, необхідно перейти на крок 15. Якщо жодної вхідної команди не отримано, то перехід на крок 3.

Крок 3: Необхідно перевірити статус періодичних завдань. У випадку, якщо настав час для виконання завдання, необхідно перейти на крок 4. У протилежному випадку перехід на крок 8.

Крок 4: Кожному періодичному завданню ставиться у відповідність перелік підзадач для його виконання. Формується перелік підзавдань.

Крок 5: На даному кроці відбувається перетворення підзавдань у команди для системи та елементів нижчого рівня для зчитування даних, зміни стану актюаторів, тощо.

Крок 6: Формується черги із команд для надсилання їх до елементів нижчого рівня.

Крок 7: Послідовне надсилання команд до елементів нижчого рівня, перехід на крок 2.

Крок 8: Запустити внутрішнє логічне ядро. Оновити значення стану середовище та запущених актюаторів.

Крок 9: Провести перевірку роботи системи згідно із внутрішньою логікою роботи ТП. Необхідно перевірити, чи параметри системи знаходяться у межах норми.

Крок 10: Надіслати звіт із змінами у стані ТП до рівня ОК.

Крок 11: У випадку виявлення виходу параметрів системи необхідно перейти на крок 12. У протилежному випадку перехід на крок 2.

Крок 12: Сформувати перелік необхідних завдань для стабілізації стану системи.

Крок 13: Перевести завдання для стабілізації стану системи у команди для елементів МК.

Крок 14: Сформувати чергу із команд для елементів нижчого рівня, послідовне виконання надсилання команд, перехід на крок 2.

Крок 15: Перевірка адресата команди. У випадку, якщо команда надійшла від ОК перехід на крок 16. У протилежному випадку перехід на крок 18.

Крок 16: Перевірити та проаналізувати отриману команду від ОК. Необхідно отримати тип команди та допоміжні параметри команди.

Крок 17: Змінити параметри роботи ТП згідно із командою від ОК. Надіслати звіт про виконання команди, перехід на крок 8.

Крок 18: Перевірити та проаналізувати отриману команду чи звіт від МК. Необхідно отримати тип повідомлення та допоміжні параметри повідомлення.

Крок 19: Оновити значення стану системи, перехід на крок 8.

Блок-схема алгоритму роботи 2-го рівня БСУЕП наведено в Додатку А1.

На третьому рівні реалізуються такі функції:

- збереження великого об'єму даних про стан системи в часі;
- глибокий аналіз даних про систему;
- представлення стану системи у зрозумілому для оператора вигляді

(SCADA системи);

- взаємодія з оператором;
- формування команд для елементів нижчого рівня; контроль зв'язку

з елементами нижчого рівня.

Окрім того, необхідно реалізувати комунікацію із оператором. Тому необхідно враховувати завдання по відображенню стану та двосторонньої взаємодії із оператором.

Крок 1: Під час запуску системи відбувається ініціалізація системи, яка включає в себе зчитування конфігурації роботи, ініціалізацію портів, ініціалізацію каналів зв'язку, ініціалізацію ядра системи та ініціалізацію інтерфейсу користувача.



Крок 2: Після ініціалізації системи, відбувається сканування вхідних каналів зв'язку на факт отримання звітів від ТП. У випадку, якщо отримано звіт, необхідно перейти на крок 10. Якщо жодної вхідної команди не отримано, то перехід на крок 3.

Крок 3: У випадку, якщо отримано команду від оператора, то необхідно перейти на крок 4, у протилежному випадку перехід на крок 2.

Крок 4: Перевірка типу вхідної команди від оператора. У випадку, якщо це є команда на отримання прогнозу стану ТП, перехід на крок 5. У протилежному випадку перехід на крок 7.

Крок 5: Запустити ядро аналізу даних про роботу системи. Конфігурація ядра і параметрів пошуку і формування прогнозу. Обчислення прогнозу.

Крок 6: Відображення результатів прогнозу для користувача. Перехід на крок 2.

Крок 7: У випадку, якщо це є команда на зміну стану ТП, перехід на крок 8. У протилежному випадку перехід на крок 2.

Крок 8: Сформувати перелік необхідних змін та переведення цих завдань у набір команд для ТП.

Крок 9: Надсилання команд до рівня ТП. Перехід на крок 2.

Крок 10: Проаналізувати вхідний звіт від ТП. Виділити тип звіту та набір вхідних даних.

Крок 11: Оновити значення у БД системи згідно із отриманих звітом.

Крок 12: Відобразити зміни у стані ТП на інтерфейсі користувача. Перехід на крок 2.

Блок-схема алгоритму роботи 3-го рівня БСУЕП наведено в Додатку А2.

Розроблені алгоритми функціонування системи можуть бути використані для побудови моделі на основі теорії мереж Петрі, що дасть змогу дослідити динаміку роботи БСУЕП на системному рівні розроблення. За результатами дослідження динаміки системи можна робити висновки про роботу БСУЕП.

### 3.3 Розробка моделей аналізу динаміки функціонування системи управління енергоефективністю підприємства

Для дослідження та аналізу роботи БСУЕП на системному рівні проектування БСУЕП розробляємо модель даної системи на основі теорії мереж Петрі [135, 136, 137, 138, 139]. Модель на основі теорії мереж Петрі описується за допомогою наступного рівняння:

$$P_n = \{P, T, S, M\}, \quad (3.3)$$

де  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  – це є множина позицій (станів);  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  – множина переходів;  $S$  – множина дуг, які поєднують між собою позиції та переходи;  $M$  – множина, яка відображає початковий стан моделі.

Розроблено на основі теорії мереж Петрі структурну модель БСУЕП, яка призначена для аналізу динаміки роботи системи та побудови графу досяжності станів. Розроблена схемна модель мережі Петрі зображено на рис.3.2.

Приклади фрагментів графів досяжності станів [140] для різних ситуації зображено в Додатку Б та Додатку Б1. Ці результати дають можливість стверджувати, що складові проектованої системи є живими, необхідні стани – досяжні, а тупики – відсутні.

Ширші можливості щодо аналізу функціонування проектованої системи дають моделі, які ґрунтуються на теорії кольорових мереж Петрі. В даному випадку модель можна описати з використанням наступного виразу [141, 142]:

$$P_n_{col} = \{P, T, S, M, TpS, PTPS, ArcStpS, CnD\}, \quad (3.4)$$

де  $TpS$  – множина типів;  $PTpS$  – множина, яка відображає можливі варіанти позицій мережі;  $ArcStpS$  – набір маркерів, які стимулюють перехід, або вказують, які типи токенів потрібно створити під час переходу;  $CnD$  – набір маркерів, які повинні стимулюватися переходом, або вказують на типи токенів потрібно створювати;  $m$  – перетворення в кольорових мережах Петрі.

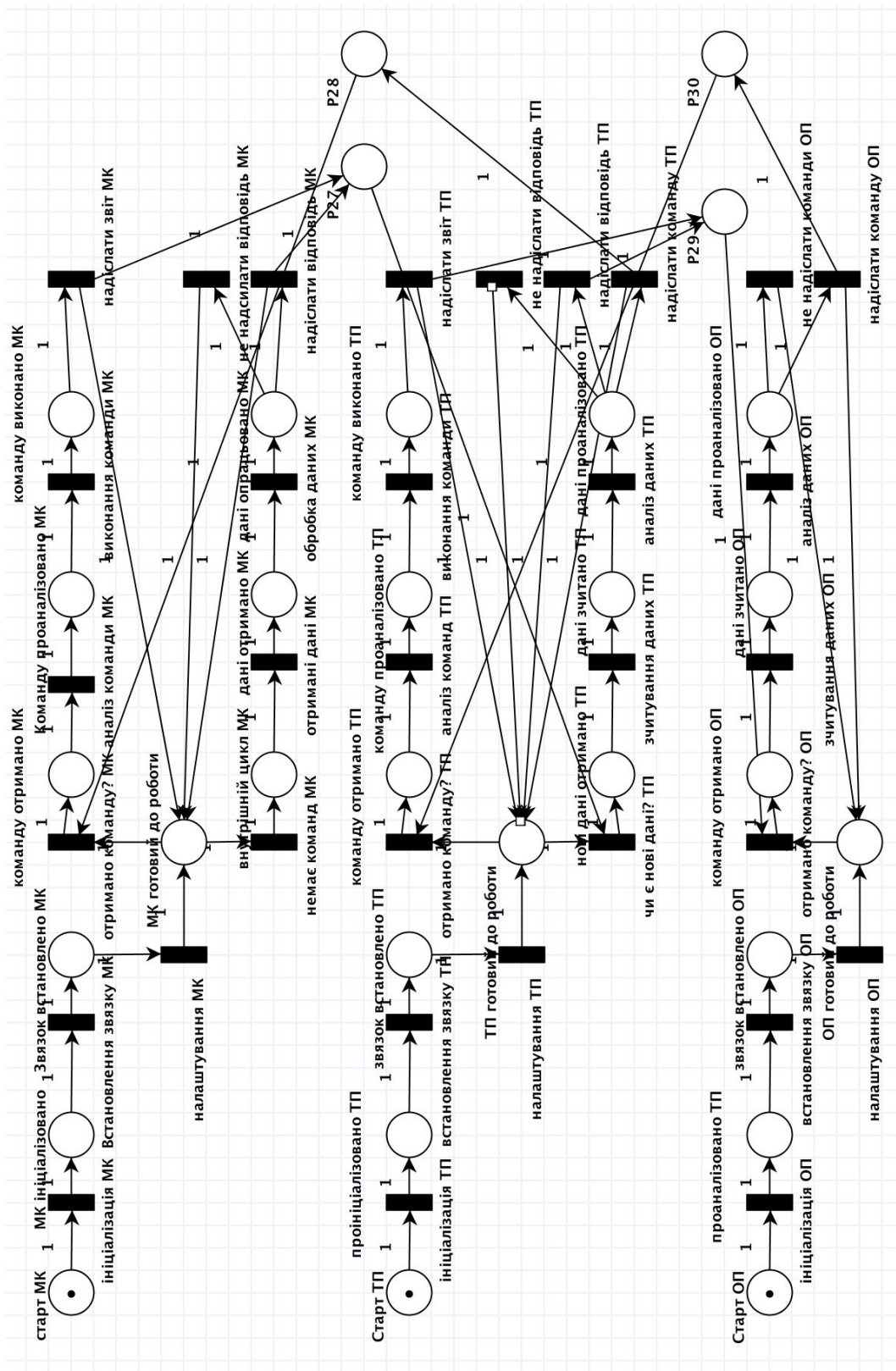


Рисунок 3.2 – Схемна модель БСУЕП для аналізу динаміки роботи

Для опису функціонування ієрархічної системи управління енергоефективністю підприємства, запропоновано використати ієрархічні моделі на основі мереж Петрі [143, 144, 145]. В загальному випадку, математична модель ієрархічної системи описується наступним виразом:

$$HMP = (MP1, P, T, F, M_0), \quad (3.5)$$

де  $MP1$  – множина Петрі 1-го рівня ( $MP1 = (MP1_1, MP1_2, \dots, MP1_n)$ ),  $n$  – кількість мереж Петрі першого рівня);  $HMP$  – основна ієрархічна мережа (або ієрархічна мережа 0-го рівня),  $P$  – множина позицій,  $T$  – множина переходів,  $F$  – множина дуг, а  $M_0$  – початкова розмітка для ієрархічної мережі Петрі  $HMP$ .

Кожна з мереж Петрі 1-го рівня описується аналогічним виразом з тою особливістю, що вона може включати мережі 2-го рівня:

$$MP1_k = (MP2_k, P, T, F, M_0), \quad (3.6)$$

де  $MP2_k$  – множина мереж 2-го рівня для  $k$ -ї мережі 1-го рівня.

Для мережі Петрі, з трьома рівнями, будемо мати ще мережі Петрі 3-го рівня:

$$MP2_k = (MP3_m, P, T, F, M_0) \quad (3.7)$$

де  $MP3_m$  – множина мереж 3-го рівня для мережі 2-го рівня  $MP2_k$ ;  $m$  – кількість мереж 3-го рівня для мережі  $MP2_k$

Побудована модель дає змогу враховувати особливості ієрархічних систем. Для моделювання роботи системи управління технологічним процесом використано ієрархічні мережі Петрі. Особливістю ієрархічних мереж Петрі є можливість побудови складних багаторівневих мереж Петрі. У випадку моделювання, мережу можна розбити на 2 основні рівні.

На першому рівні знаходиться підмережі для моделювання роботи

кожного із рівнів системи. Кожна із МП рівня має вхідний та вихідний стек команд. Система працює у двох основних режимах. Перший режим передбачає виконання внутрішніх завдань та формування звітів. У другому режимі відбувається аналіз вхідних даних та виконання команд при потребі.

МП для дослідження роботи рівня збору даних та управління виконавчими механізмами (рис.3.3), включає у себе частину підмережі, яка відповідає за попередню ініціалізацію, основні цикли роботи рівня та роботу із вхідними-вихідними даними. Однією із особливостей роботи мікроконтролерів, які часто беруться за основні елементи даного рівня, є виконання інструкції у головному циклі. Відповідно, неможливо організувати одночасне виконання внутрішнього циклу роботи та обробку вхідних команд від елементів вищого рівня. Якщо у буфері знаходиться хоча б одна команда, то мікроконтролер запускає цикл опрацювання команд. У випадку, якщо буфер порожній, то мікроконтролер самостійно буде виконувати внутрішню логіку, перевірки та надсилати звіти назовні.

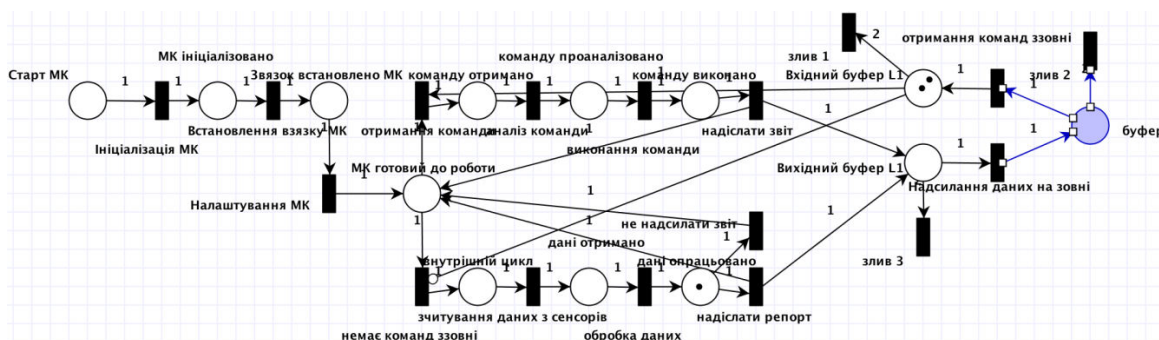


Рисунок 3.3 – Підмережа Петрі рівня збору даних та управління виконавчими механізмами

На основі побудованої моделі рівня роботи збору даних та управління виконавчими механізмами підмережі Петрі було згенеровано граф досяжності станів моделі на рис.3.4. Даний граф має 2 основні цикли роботи, перший з яких відповідає за виконання внутрішньої логіки, другий за обробку та

виконання зовнішніх команд. Усі стани і переходи під мережі є досяжними, тупикові стани відсутні. Модель роботи рівня збору даних та управління виконавчими механізмами працює коректно.

Підмережа Петрі для дослідження роботи рівня контролю та управління технологічним процесом (рис.3.5). Включає у себе частину підмережі, яка відповідає за попередню ініціалізацію системи управління технологічним процесом, внутрішні цикли роботи та оброблення вхідних-вихідних даних.

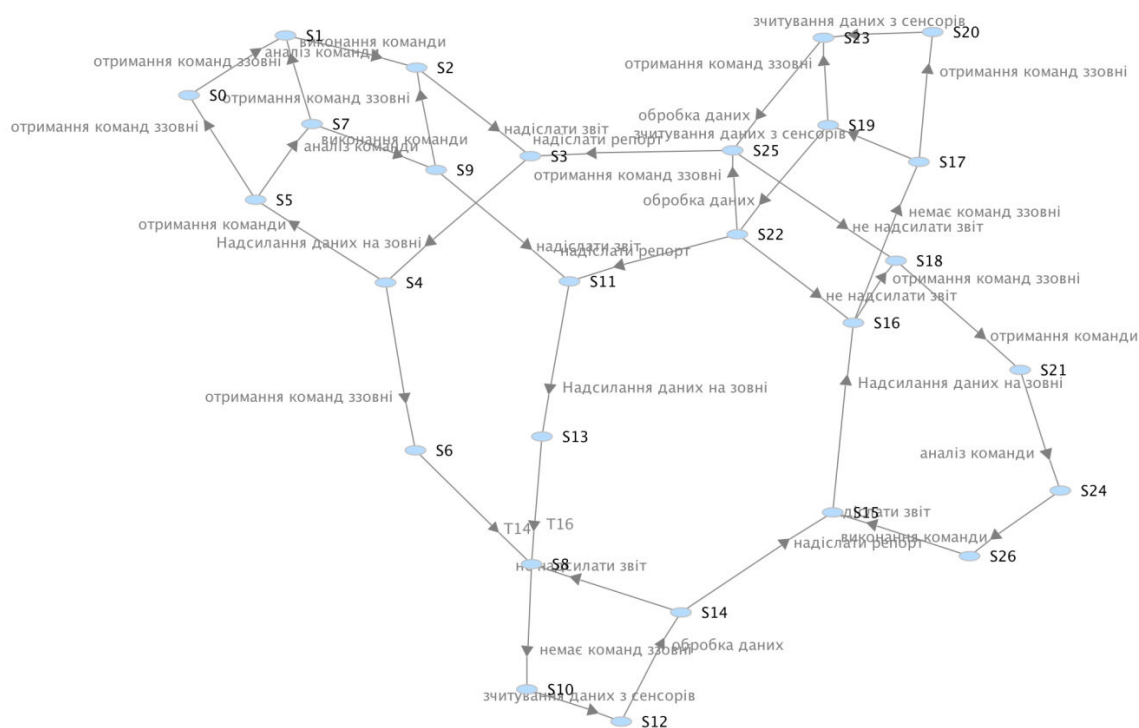


Рисунок 3.4 – Граф досяжності станів під мережі рівня збору даних та управління виконавчими механізмами

Однією із особливостей роботи технологічного процесу, є можливість виконання декількох інструкції у головному циклі. Одночасно можна отримувати команди від вищого рівня, звіти/дані від нижнього рівня або виконувати внутрішній цикл. Якщо у буфері знаходиться хоча б одна команда, то стартує цикл опрацювання команд. Якщо у буфері знаходиться хоча б один

пакет даних, то стартує цикл опрацювання даних. У випадку, якщо буфер є пустий, то стартує цикл внутрішньої логіки який запускає перевірки та надсилаються звіти на вищий рівень або команди на нижчий рівень.

На основі побудованої моделі рівня збору даних та управління виконавчими механізмами підмережі Петрі було згенеровано граф досяжності станів моделі на рис.3.6. Даний граф має 4 основні підцикли роботи, перший з яких відповідає за виконання внутрішньої логіки та надсилання команд, другий відповідає за виконання внутрішньої логіки та надсилання звітів, третій відповідає за зчитування вхідних даних та їхня обробка, четвертий відповідає за отримання команд та їхнє виконання.

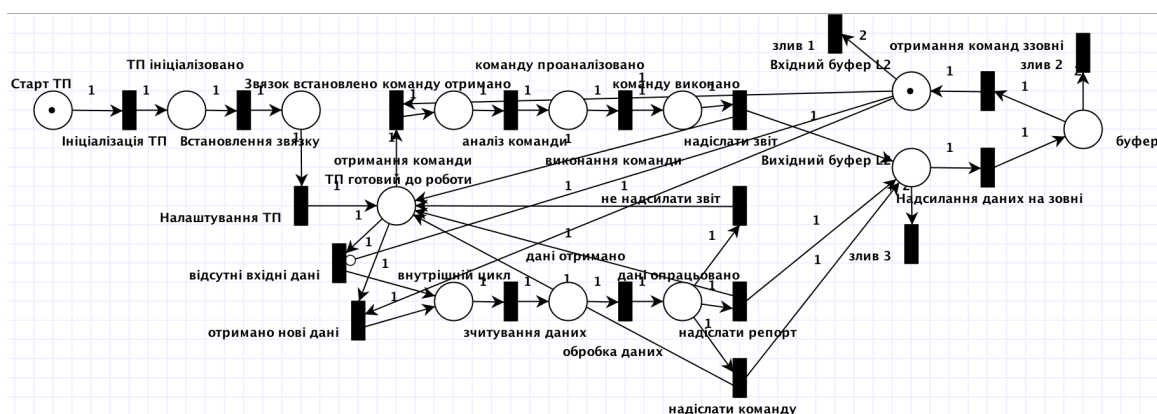


Рисунок 3.5 – Під мережа Петрі рівня контролю та управління технологічним процесом

Усі стани і переходи під мережі є досяжними, тупикові стани відсутні. Модель роботи рівня збору даних та управління виконавчими механізмами працює коректно.

Підмережа Петрі для дослідження роботи рівня операторського контролю та формування управлінських рішень (рис.3.7). Включає у себе частину підмережі, яка відповідає за попередню ініціалізацію системи управління технологічним процесом, внутрішні цикли роботи та обробку вхідних-вихідних даних. Однією із особливостей роботи рівня операторського контролю є

можливість виконання декількох функцій у головному циклі. Одночасно можна отримувати звіти/дані від нижнього рівня, виконувати внутрішній цикл, отримувати та опрацьовувати команди від оператора. Якщо у буфері знаходиться хоча б один пакет даних, то стартує цикл опрацювання даних. У випадку, якщо буфер є пустий, то стартує цикл внутрішньої логіки який запускає перевірки та надсилає команди на нижчий рівень. Також оператор має можливість формувати власні команди для управління системою.

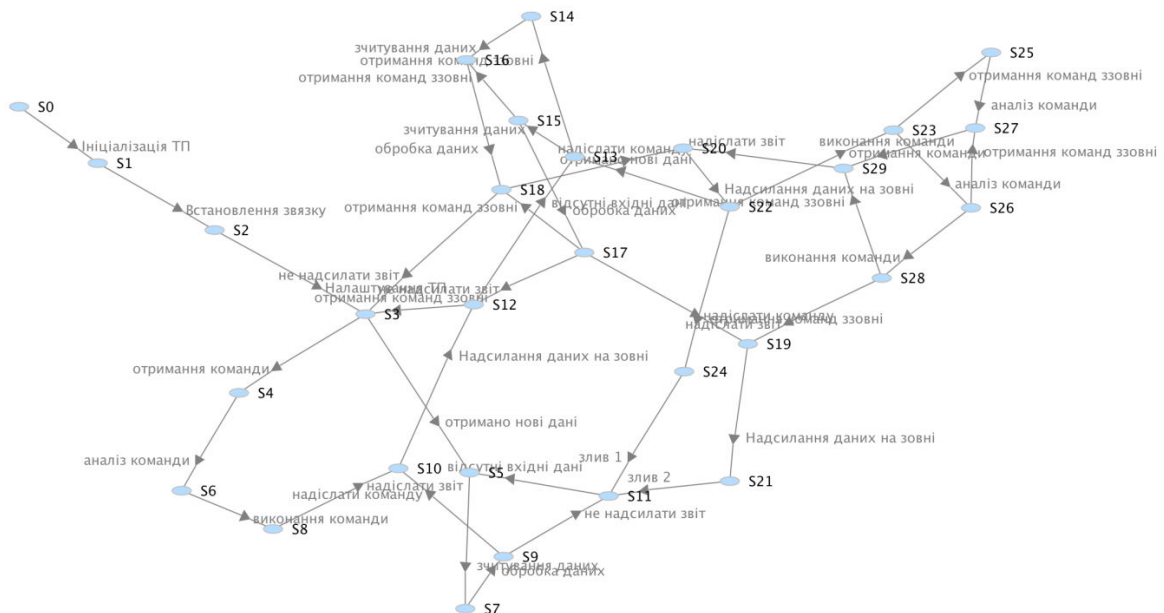


Рисунок 3.6 – Граф досяжності станів під мережа Петрі рівня контролю та управління технологічним процесом

На основі побудованої моделі рівня операторського контролю та формування управлінських рішень підмережі Петрі було згенеровано граф досяжності станів моделі на рис.3.8. Даний граф має 3 основні підцикли роботи, перший з яких відповідає за виконання внутрішньої логіки та надсилання команд, другий відповідає за опрацювання команд від користувача, третій відповідає за зчитування вхідних даних та їхня обробку.

Усі стани і переходи під мережі є досяжними, тупикові стани відсутні.



Модель роботи рівня збору даних та управління виконавчими механізмами працює коректно. Після того, як були побудовані підмережі Петрі для кожного із рівнів, можна реалізувати загальну модель мереж Петрі, яка враховує комунікацію між рівнями (рис.3.9). Є наступні особливості роботи мережі, як кожен із рівнів здатний комунікувати із своїми сусідами та передавати команди або дані. Для коректної роботи системи є виділена область пам'яті для збереження та накопичення команд та даних. Область пам'яті розбита на буфери, які одночасно є доступні декільком рівням. Саме тому мережа Петрі розбита на 3 підмережі, кожна з яких відповідає за отримання команд та формування даних заданого рівня. На основі побудованої моделі комунікації та взаємодії рівнів було згенеровано граф досяжності станів моделі зображений на рис.3.10. Даний граф має 3 основні цикли роботи, перший з яких відповідає за комунікацію між першим та другим рівнями, другий цикл відповідає за комунікацію другого та третього рівнів.

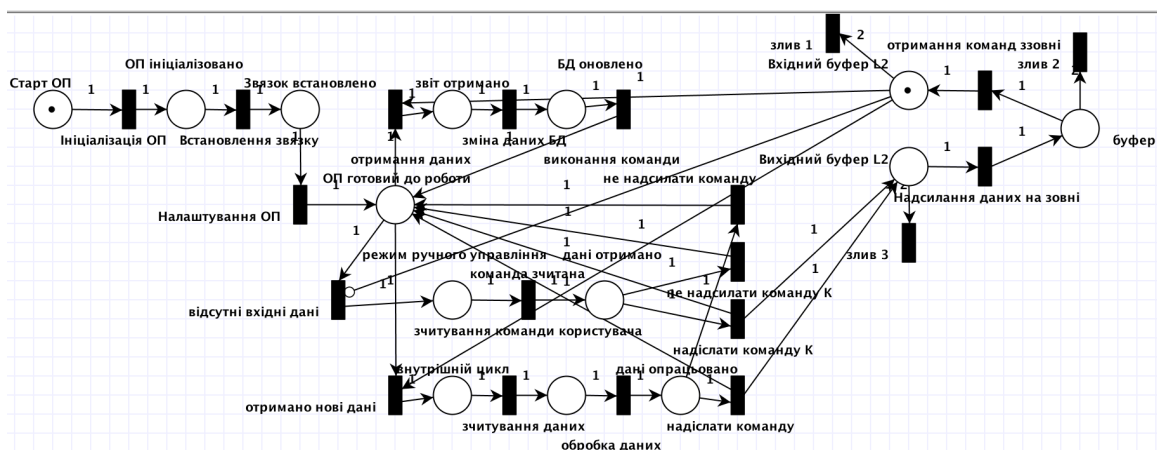


Рисунок 3.7 – Підмережа Петрі рівня операторського контролю та формування управлінських рішень

Усі стани і переходи підмережі є досяжними, тупикові стани відсутні. Модель роботи рівня збору даних та управління виконавчими механізмами працює коректно.

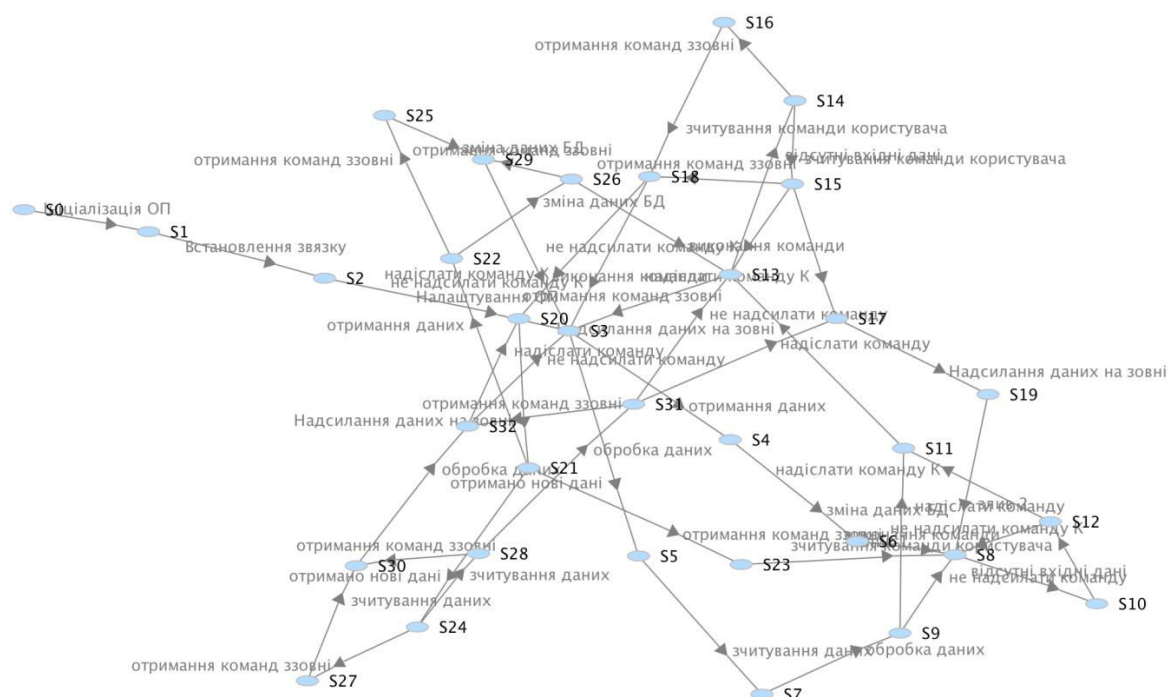


Рисунок 3.8 – Граф досяжності станів під мережа Петрі рівня операторського контролю та формування управлінських рішень

### 3.4 Висновки до розділу 3

1. Розроблено трирівневу базову архітектуру БСУЕП із змінним складом обладнання, яка має постійне ядро та змінні модулі за допомогою яких забезпечується адаптація системи до вимог конкретного підприємства. Ядром розробленої БСУЕП є інтернет-сервер, сервери баз даних другого і третього рівнів управління та засоби зв'язку. Змінними модулями для першого рівня управління є – давачі, виконавчі механізми та мікроконтролерні системи, для другого рівня – ПЛК та ОК, а для третього – ПК.

2. Запропоновано розроблення швидкодіючих, малогабаритних та з малою потужністю енергоспоживання апаратних компонент першого рівня здійснюється на базі мікроконтролерів з фіксованою комою, невеликою розрядною сіткою, усіченим інтерфейсом і скороченою системою команд.

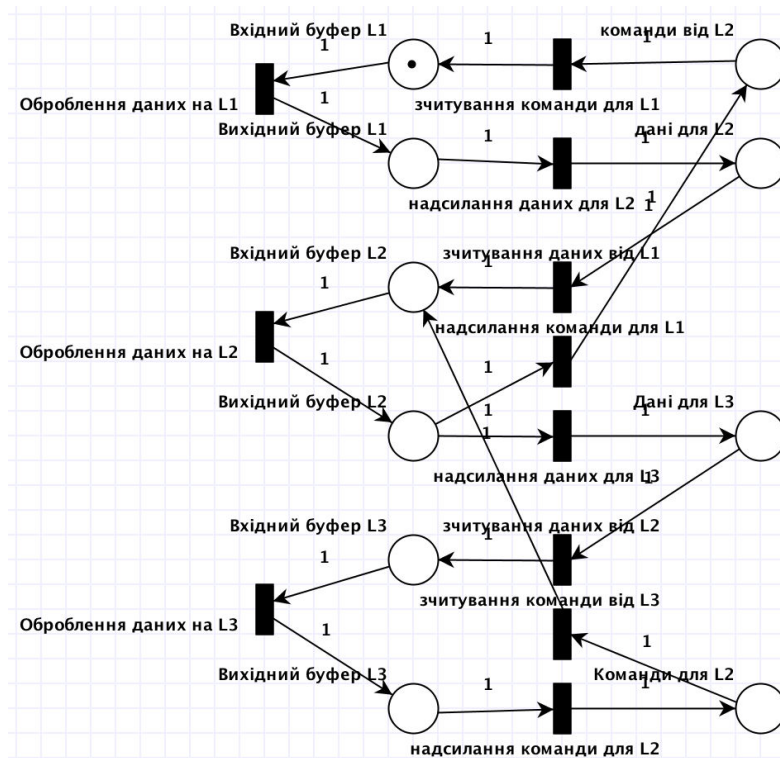


Рисунок 3.9 – Мережа Петрі комунікації та взаємодії рівнів



Рисунок 3.10 – Граф досяжності станів під мережа Петрі комунікації та взаємодії рівнів

3. Вибрано для програмування мікроконтролерів середовище програмування CoDeSys (Controllers Development System), редактори та налагоджувальні засоби, якого ґрунтуються на принципах середовищ професійного програмування (VisualC++ тощо).

4. Запропоновано використовувати технологію Device Hive для об'єднання провідними та безпроводними каналами до мережі Інтернет давачів, мікроконтролерних систем і виконавчих механізмів.

5. Розроблено алгоритми функціонування системи та побудовано моделі динамічного аналізу функціонування засобів інформаційної технології багаторівневого управління енергоефективністю, які за рахунок використання теорії простих, кольорових та ієрархічних мереж Петрі та їх розширень забезпечують прийняття рішення про відповідність функціонування системи згідно з вимогами технічного завдання.

6. Наведено результати аналізу засобів ІТ багаторівневого управління енергоефективністю підприємства у формі графів досяжності станів в яких може перебувати кожна з досліджуваних складових. Отримані результати дають змогу стверджувати, що усі стани є досяжними, мережа є живою, а тупикові стани – відсутні.

## РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ЗАСОБІВ ЗБОРУ ТА ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ ПІДПРИЄМСТВА

4.1 Розроблення структури інформаційної технології збору та опрацювання даних для системи управління енергоефективністю підприємства

Побудована структура інформаційної технології збору та опрацювання даних для системи управління енергоефективністю підприємства зображена на рис.4.1.

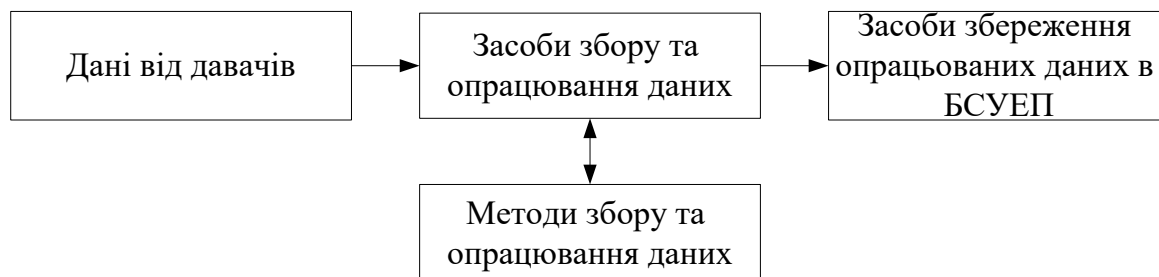


Рисунок 4.1 – Структура ІТ збору та опрацювання даних для системи управління енергоефективністю підприємства

Розроблена ІТ з допомогою засобів збору та опрацювання даних в яких реалізовано методи, що розроблені в другому та третьому розділах дисертаційної роботи, опрацьовує дані, які отримані від підсистеми давачів. Наступний етап роботи ІТ полягає у збереженні опрацьованих даних у форматі зручному для аналізу і прийняття оптимальних рішень щодо підвищення енергоефективності підприємства.

4.2 Розроблення засобів системи синтезу мікроконтролерних засобів збору та опрацювання даних

Один з перших етапів побудови системи полягає у синтезі її структури [146].

Для синтезу мікроконтролерних систем необхідно розробити програмний продукт, який полегшить вибір базових елементів та генерацію варіантів поєднання елементів у єдину систему (структурну схему). В той же час необхідно автоматизувати процес відбору та порівняння базових елементів між собою для вибору оптимального варіанту структури пристрою.

Програмний продукт системи пристрою повинен виконувати наступні функції, а саме:

- Генерувати інтерфейси користувача, за допомогою яких оператор буде мати змогу керувати програмою, а саме: інтерфейси користувача для введення критеріїв вибору елементів із елементної бази; інтерфейси користувача для введення критеріїв синтезу мікроконтролерних систем; інтерфейси користувача для відображення даних про елементну базу.

- Модуль роботи із елементною базою, а саме додавання, видалення, редагування та перегляд інформації про базу компонентів.

- Модуль роботи із результатами відбору та синтезу. Необхідно мати функції збереження та завантаження даних.

- Модуль вибору елементів із елементної бази згідно із заданими критеріями. Модуль має обчислювати значення цільової функції для кожного елемента. За їх допомогою можна посортувати елементи за загальною ефективністю.

- Модуль синтезу мікроконтролерних систем згідно із заданими параметрами синтезу. На вході мають бути дані про базові елементи, а на виході сформовані альтернативи. Для кожної із альтернатив обчислюється значення цільової функції. Необхідно мати можливість сортувати альтернативи по спаданню ефективності.

Відповідно програмну систему можна розділити на 5 основних модулів (Рис.4.2).

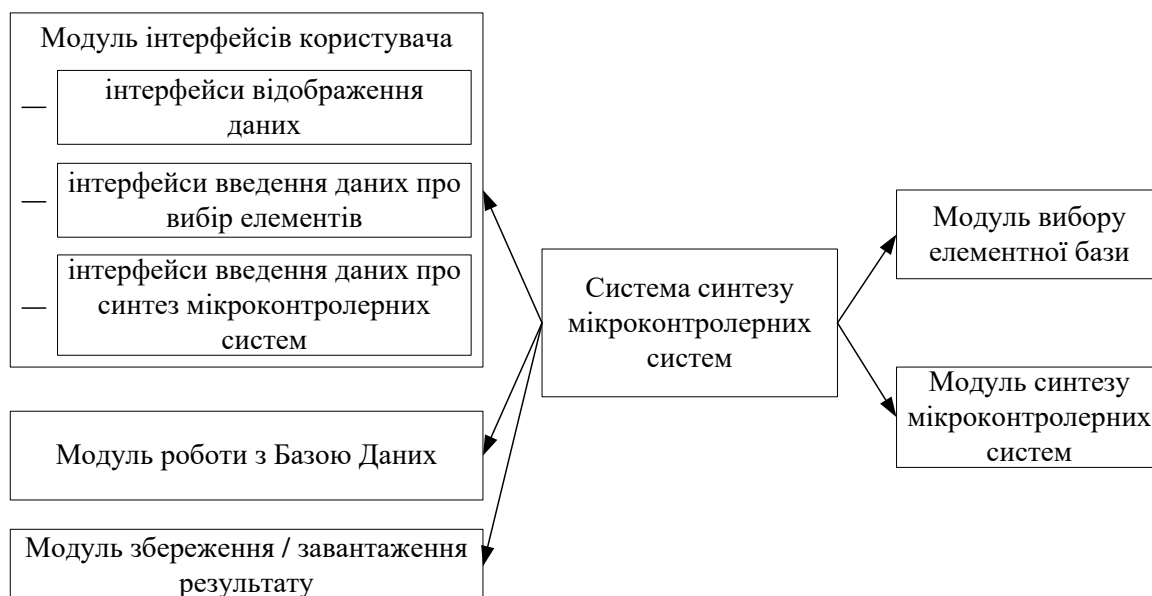


Рисунок 4.2 – Структуру програми синтезу мікроконтролерних систем

В основі системи синтезу є базові компоненти, кожен із яких володіє власними особливостями. Запропоновано використовувати наступні базові компоненти: мікроконтролери; датчики; актюатори; модулі розширення та інше.

За допомогою даних базових компонент (БК) та їх поєднання можна генерувати різноманітні системи.

Блок-схема алгоритму роботи програми синтезу мікроконтролерних систем наведена в Додатку В, який включає наступні кроки:

Крок 1. Початок програми, ініціалізація початкового меню системи

Крок 2. Перевірка коректності введених базових компонентів. Необхідно додати базові компоненти – перехід на крок 3, навпаки – перехід на крок 4.

Крок 3. Додати, відредагувати чи видалити базовий компонент. Перехід на крок 2.

Крок 4. Перевірка умов вибору базових компонентів. Необхідно вибрати базові компонент певного типу – перехід на крок 5, навпаки – перехід на крок 9.

Крок 5. Зчитування переліку критеріїв відбору та вагових коефіцієнтів.

Крок 6. Відфільтрувати базові компоненти згідно із критеріями відбору.

Крок 7. Обчислити значення цільової функції для кожного відфільтрованого базового компоненту.

Крок 8. Відсортувати результати відбору та записати їх у файл. Перехід на крок 4.

Крок 9. Зчитування даних про критерії синтезу.

Крок 10. Завантаження переліку відфільтрованих базових компонентів із файлів.

Крок 11. Повний перебір та генерація альтернатив. Врахування сумісності компонентів по інтерфейсам.

Крок 12. Обчислення значення цільової функції для кожної з альтернатив.

Крок 13. Сортування результатів та їхнє збереження у файл.

Розроблена структура класів програми синтезу мікроконтролерних систем зображена в Додатку В1, Додатку В2 та Додатку В3, які складаються із декількох модулів, кожен із яких є поділений на пакети Java класів [147, 148].

Пакет класів моделей складається із класів, які зберігають дані про базові компоненти. У пакеті знаходяться:

`BaseComponent` – клас предок для усіх базових компонентів. Він містить поля, які є спільні для всіх базових компонентів. Для прикладу `id`, ціна, розміри та інші.

`Microcontroller` – містить базові дані про мікроконтролер. Клас наслідується від `BaseComponent` та містить додаткові поля для опису властивостей мікроконтролера.

`Sensor` – містить базові дані про датчик. Клас наслідується від `BaseComponent` та містить додаткові поля для опису властивостей датчиків.

`Actuator` – містить базові дані про актюатор. Клас наслідується від `BaseComponent` та містить додаткові поля для опису властивостей актюатора.

`Shield` – містить базові дані про модуль розширення. Клас наслідується від `BaseComponent` та містить додаткові поля для опису властивостей модуля розширення.



`BaseType` – клас описує тип компонентів. Для прикладу давач температури, обігрівач тощо. Ці дані необхідні для того, щоб можна було чітко фільтрувати базові компоненти за їхньою групою.

Пакет класів джерел даних складається із класів, які імплементують інтерфейси для роботи із даними про базові компоненти. Пакет включає:

`IdataSource` – це є базовий інтерфейс, згідно з яким відбувається роботам із даними. Включає у себе методи для зчитування даних, оновлення, видалення та пошуку даних про базові компоненти.

`BaseDataSource` – базовий клас для роботи із даними. Він містить спільну логіку для формування SQL команд [149] за зчитування візповідей при комунікації з БД [150, 151, 152].

`MicrocontrollerDataSource` – клас для роботи з даними про мікроконтролери.

`SensorDataSource` – клас для роботи з даними про мікроконтролери.

`ActuatorDataSource` – клас для роботи з даними про актюатор.

`ShieldDataSource` – клас для роботи з даними про модулі розширення.

`TypeDataSource` – клас для роботи з даними про типи елементів.

Пакет обчислювального ядра складається із класів, які використовуються для відбору базових компонент та синтезу конфігурації мікроконтролерних компонент. Пакет включає:

`SelectionCondition` – клас модель для збереження даних про критерії відбору базових компонент. Містить інформацію про тип параметру, нижню і верхню границі дозволених значень тощо.

`HardwareSelection` – основний клас для фільтрації базових компонент та обчислення значень цільових функцій.

`ItemToMatrixConverter` – клас, який включає методи для конвертації даних про базові компоненти у матриці, для подальшої обробки.

`ItemSelectionFilter` – клас, який використовується для фільтрації набору базових компонент згідно із критеріями відбору.

`WeightCoefNormalizer` – допоміжний клас, який використовується для нормалізації даних про вагові коефіцієнти відносної важливості критеріїв.

`ObjectiveFunctionComputer` – допоміжний клас, який обчислює значення цільової функції для кожного із базових компонент з урахуванням вагових коефіцієнтів.

`HardwareSynthesis` – Основний клас для синтезу альтернатив поєднання компонентів між собою.

`PortBallanceChecker` – допоміжний клас, який використовується для перевірки сумісності мікроконтролера та інших компонентів по портам.

Система складається і з інших допоміжних класів, які використовуються для ініціалізації БД, роботи з файлами та генерації інтерфейсів користувача.

#### 4.3 Розроблення інформаційного забезпечення системи синтезу елементів системи управління енергоефективністю підприємства

За основу інформаційного забезпечення системи синтезу використано реляційну базу даних, а саме – SQLite. Відповідно, у базі даних присутні такі таблиці для збереження інформації про складові компоненти системи управління енергоефективністю підприємства:

- Мікроконтролери.
- Давачі.
- Актюатори.
- Плати розширення.
- Типи елементів.
- Користувачі.

Розроблено структуру бази даних, яка містить інформацію про базові компоненти та їхні типи, яка зображена на рис.4.3.

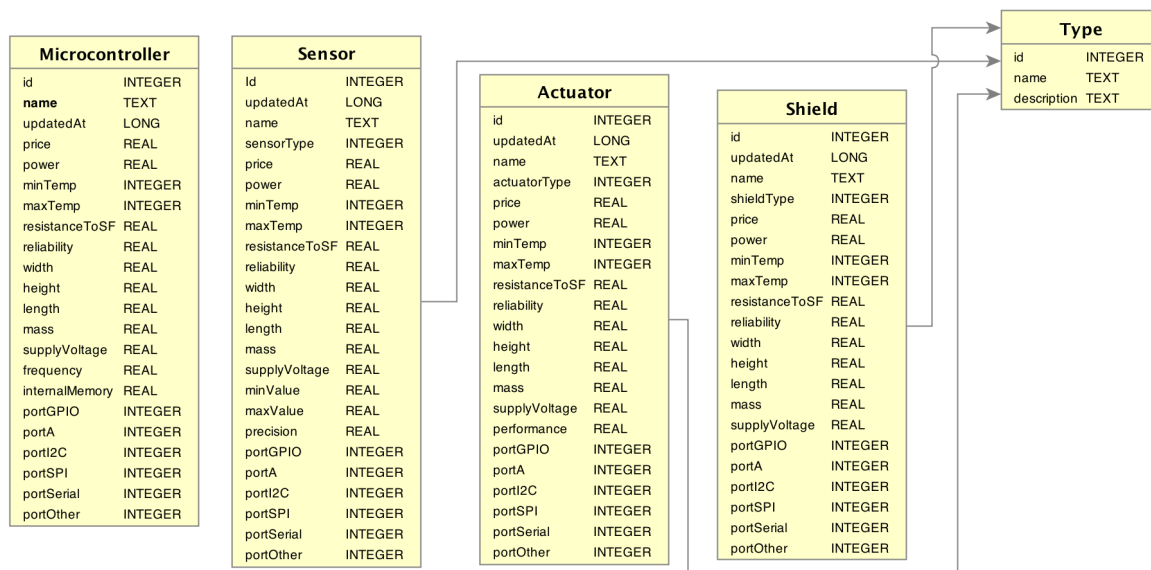


Рисунок 4.3 – Структура бази даних

Таблиці “Мікроконтролери”, “Давачі”, “Актюатори”, “Плати розширення” відповідно, представляють основні складові компоненти мікроконтролерної системи. Зокрема, розроблені структури таблиць “Мікроконтролери”, “Давачі”, “Актюатори” та “Плати розширення” наведено в Додатку Д. Таблиці “Типи давачів”, “Типи актюаторів” та “Типи плат розширення” внесені для точнішого синтезу мікроконтролерної системи, адже типів давачів, актюаторів і тим більше плат розширення є надзвичайно багато і всі відрізняються за своїм призначенням. Тому ці таблиці дають можливість вказувати конкретний тип компонента. Наприклад: не “давач” в загальному, а “давач температури”. Кожна з цих таблиць має однакові колонки, а саме:

Структура таблиці “Типи компонентів”:

- Id;	CREATE TABLE `Type` (
- Id користувача;	`id` INTEGER PRIMARY KEY
- Назва;	AUTOINCREMENT,
- Опис;	`name` TEXT UNIQUE,
	`description` TEXT
	);

Для того, щоб синтезувати компоненти необхідно мати вибірку базових компонент для кожного із слотів системи. Відповідно по завершенню вибору БК формується файл, у якому зберігається інформація про критерії відбору та результати відбору. Результати роботи системи відбору зберігаються у JSON файлі.

Приклад даних про вибірку базових компонент:

```
{ "condition": [{"name": "microcontroller", "type": null, "key": "price", "minValue": 0, "maxValue": 25, "orientation": 2, "weightCoef": 2}, {"name": "microcontroller", "type": null, "key": "frequency", "minValue": 16, "maxValue": 32, "orientation": 1, "weightCoef": 1}], "components": [{"id": 1, "updatedAt": 25666665, "name": "microcontroller", "price": 25, "minTemp": 0, "maxTemp": 0, "resistanceToSF": 4, "reliability": 2, "width": 20, "height": 22, "length": 18, "mass": 15, "supplyVoltage": 45, "portGPIO": 1, "portA": 2, "portI2C": 3, "portSPI": 2, "portSerial": 2, "portOther": 1, "sensorType": 1, "minValue": 2, "maxValue": 25, "precision": 4}]}
```

На етапі синтезу вибірки БК завантажуються із файлів та використовуються для генерації альтернатив. Результати вибірки містять інформацію про кращі альтернативи та відповідне значення цільової функції.

#### 4.4 Розроблення засобів зменшення потужності множини альтернативних рішень

Процес автоматизованого синтезу структур засобів збору та опрацювання даних, передбачає генерування множини рішень, яка, як правило, є великої розмірності. Відповідно, необхідно розробити програмні засоби зменшення потужності множини альтернативних рішень.

##### 4.4.1 Підсистема зменшення потужності множини альтернативних рішень на базі побудови множини ефективних рішень Парето

Перший етап розроблення будь якої програмної системи пов'язаний з розробленням її структури. Приклад, спроектованої структури системи

розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації на основі побудови множини Парето [153, 154] ґрунтується на модульному принципі і включає такі основні складові (див. рис.4.4): підсистема введення даних; підсистема контролю введених даних; модуль забезпечення інтерфейсу користувача; модуль обчислень; модуль вводу результатів обчислень у текстовому форматі; модуль представлення даних в XML-форматі [155].

Модульна організація системи дає змогу швидко та ефективно вносити зміни в процесі її вдосконалення та розвитку.

В процесі розв'язання ЗБО, використано алгоритм знаходження рішень, що належать до множини Парето  $P(Y)$ , який має наступні кроки.

Крок 1. Присвоїти  $P(Y)=Y$ ,  $i=1$ ,  $j=2$ . Тим самим створити так звану початкову множину Парето, яка на початку роботи алгоритму співпадає з множиною  $Y$ , а в кінці – сформує шукану множину Парето – оптимальних рішень багатокритеріальної задачі. Алгоритм побудований таким чином, що шукана множина Парето формується з  $Y$  послідовним видаленням свідомо неоптимальних векторів.

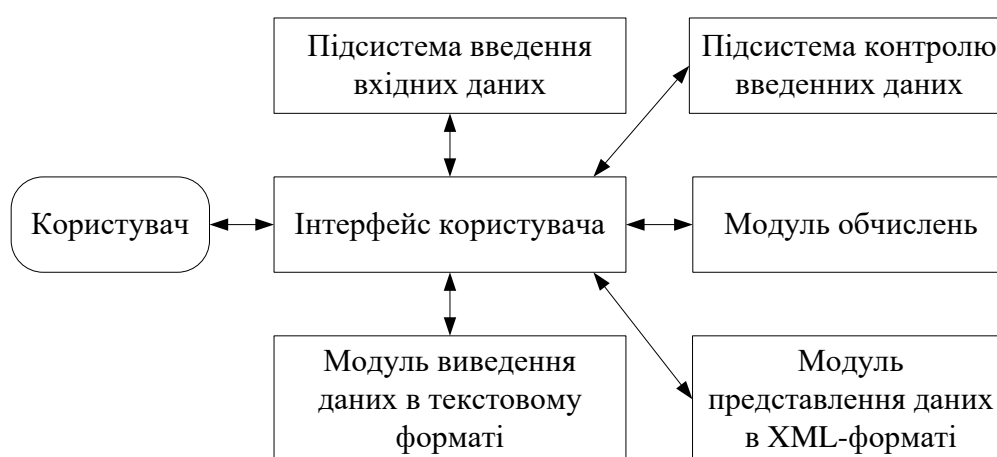


Рисунок 4.4 – Структура системи зменшення потужності множини альтернативних рішень з використанням критерію Парето

Крок 2. Перевірити виконання нерівності  $y_i \geq y_j$ . Якщо нерівність виявилася істинною, то перейти до Кроку 3. В іншому випадку перейти до Кроку 5.

Крок 3. Видалити з поточної множини векторів  $P(Y)=Y$  вектор  $y_j$ , так як він не є Парето-оптимальним. Потім перейти до Кроку 4.

Крок 4. Перевірити виконання нерівності  $j < N$ . Якщо вона виконується, то присвоїти  $j = j + 1$  і повернутися до Кроку 2. В іншому випадку – перейти до Кроку 7.

Крок 5. Перевірити правдивість нерівності  $y_j \geq y_i$ . У тому випадку, коли вона є істинною, перейти до Кроку 6. В іншому випадку – повернутися до Кроку 4.

Крок 6. Видалити з поточної множини векторів  $P(Y)=Y$  вектор  $y_i$  і перейти до Кроку 7.

Крок 7. Перевірити виконання нерівності  $i < N - 1$ . У разі істинності цієї нерівності слід послідовно присвоїти  $i = i + 1$ , а потім  $j = i + 1$ . Після цього необхідно повернутися до Кроку 2. В іншому випадку (тобто коли  $i < N - 1$ ) обчислення закінчити.

В процесі реалізації системи, використано мову Java. Розроблена та реалізована діаграма класів програмного забезпечення зображена на рис.4.5, а призначення кожного кроку – в таблиці 4.1.

Програмне забезпечення системи написано на мові програмування JAVA з використанням стандартних бібліотек та бібліотеки JAVA FX для розробки інтерфейсу користувача.

Система забезпечує користувача зручним інтерфейсом та дає змогу розв'язувати задачі великої розмірності. Розроблений додаток дає змогу завантажити файл вхідних даних з диску на комп'ютері, обчислити Парето – оптимальні рішення та записати отримані значення у файл.

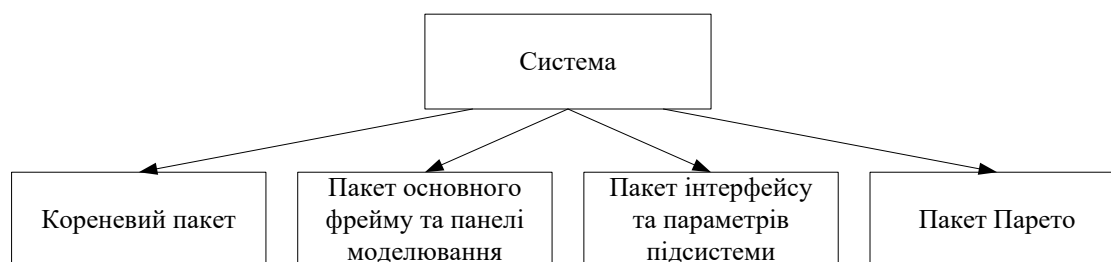


Рисунок 4.5 – Пакети класів розробленої системи

Таблиця 4.1

## Структура пакетів аплікації

Пакет	Призначення	Класи
org.lp.qs	Кореневий пакет аплікації, містить клас з точкою входу	App.java
org.lp.qs.ui	Пакет містить клас основного фрейму	MainFrame.java
org.lp.qs.model.api	Пакет містить клас параметрів та інтерфейс системи	Parameter.java Decision.java
org.lp.qs.pareto.impl	Пакет містить класи реалізації методу Парето	ParetoObject.java

Основним класом програми є клас ParetoObject, який містить всі поля та методи, які необхідні для вдалого обчислення Парето – оптимальної множини рішень. Клас оперує даними класу Decision, який представляє одне рішення, і містить два поля int id – порядковий номер рішення, double[] data – масив значень критеріїв. Також розроблено декілька класів контролерів для користувальницького інтерфейсу з бібліотеки JavaFX, в яких містяться методи, які оперують даними, зв'язують дані з відповідними об'єктами користувальницького інтерфейсу, та методи зчитування з файлу та запису даних в файл. Отже, використання мови Java забезпечує платформонезалежність розробленого програмного продукту.

Розроблене інформаційне забезпечення системи ґрунтується на структурах даних вхідного та вихідного файлів. Програмна система дає змогу зчитати в програму вхідні дані з використанням спеціального меню та вхідного і вихідного файлів. В цьому випадку, система зчитує вхідні дані з файлу з довільним іменем і розширенням \*.TXT та структури даних, приклад якої зображено на рис.4.6.

В цьому файлі повинні міститися опції, такі як значення за яким будуть проводитися порівняння (може бути max або min) після мітки *#EVALUATE\_BY*, кількість рішень в файлі після мітки *#DECISIONS\_COUNT*, кількість критеріїв за якими проводяться порівняння після мітки *#CRITERIONS\_COUNT*, та проіндексованих даних після мітки *#DATA*.

Дані представляються десятковими дробовими числами у пронумерованих рядках, де стовпці розділені знаком «;» (крапка з комою), кількість стовпців відповідає кількості критеріїв. Кожен рядок даних має починатися з цілого числа та символу «)», для індексації.

```
#EVALUATE_BY
max
#DECISIONS_COUNT
20
#CRITERIONS_COUNT
3
#DATA
0)72.06;34.23;66.01;
1)49.31;42.22;95.34;
2)16.66;72.43;39.4;
...
```

Рисунок 4.6 – Структура вхідного файлу

Для розв'язання поставленої задачі з використанням розробленої системи необхідно завантажити систему на виконання. Введемо вхідні дані (рис. 4.7).

Після завантаження файлу, дані поміщаються в таблицю, де кожний рядок представляє собою рішення (стовпець ID – індекс рішення, а стовпці  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  ... – критерії).



Для того щоб обчислити множину Парето оптимальних рішень, потрібно натиснути на кнопку «Вирахувати оптимальні множини» (рис. 4.7).

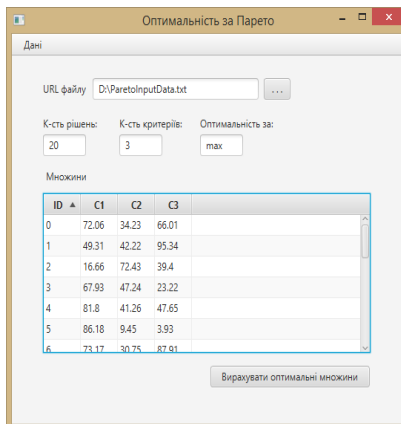


Рисунок 4.7 – Головне вікно після завантаження файлу

Розгорнуті результати можна переглянути в збереженому файлі на диску (рис.4.8).

*Результати програми:*

*Програму було успішно виконано за 32 порівняння.*

*Кількість рішень: 20*

*Кількість критеріїв: 3*

*Оптимальність за: max*

*Кількість Парето - оптимальних рішень: 6*

*Парето - оптимальні множини:*

*1) {49.31; 42.22; 95.34}*

*6) {73.17; 30.75; 87.91}*

*7) {49.94; 95.35; 52.54}*

*.....*

*Відкинуті множини:*

*0) {72.06; 34.23; 66.01}*

*2) {16.66; 72.43; 39.4}*

*3) {67.93; 47.24; 23.22}*

Рисунок 4.8 – Результати тестової роботи програми

Отже, розроблена система дає змогу зменшити потужність множини альтернативних рішень з використанням підходу на основі побудови множини оптимальних рішень Парето. Розроблена система використовує наступний

принцип реалізації, що забезпечує швидше вдосконалення програмного продукту. Побудовано програмне забезпечення системи, а при реалізації системи використано технологію Java, що дає змогу використовувати програмний продукт під різними операційними системами та на різних технічних платформах. Розроблено інформаційне забезпечення та структурну схему роботи системи. Наведено результати тестування розробленого програмного засобу, що дає змогу стверджувати про правильність та коректність роботи системи.

#### 4.4.2 Підсистема зменшення потужності множини альтернативних рішень на базі згорток

Розроблення системи розв'язання ЗБО з використанням адативної, мультиплікативної та максимінної і мінімаксної згорток дає можливість зменшити потужність множини альтернативних рішень [156, 157, 158].

Структура підсистеми зображена на рис. 4.9. Вона включає: інтерфейс користувача, який забезпечує зв'язок між програмою та проектувальником; модуль введення/виведення даних, який дає змогу ввести дані в інтерактивному режимі та забезпечити роботу з файлами; модуль нормування часткових критеріїв оптимізації, який дає змогу реалізувати різні види нормування часткових критеріїв та модуль оптимізації з використанням згорток, який призначений для вибору виду згортки та безпосередньої реалізації оптимізації. В процесі реалізації використана модульна організація, що забезпечує швидку модифікацію розробленої підсистеми.

Блок-схема алгоритму роботи підсистеми наведено в Додатку Е. Особливістю якого є можливість представлення як вхідних, так і проміжних даних в XML-форматі. Така особливість забезпечує ефективний обмін з іншими існуючими підсистемами.

Програмне забезпечення підсистеми реалізовано на мові Java, що забезпечує її платформонезалежність.

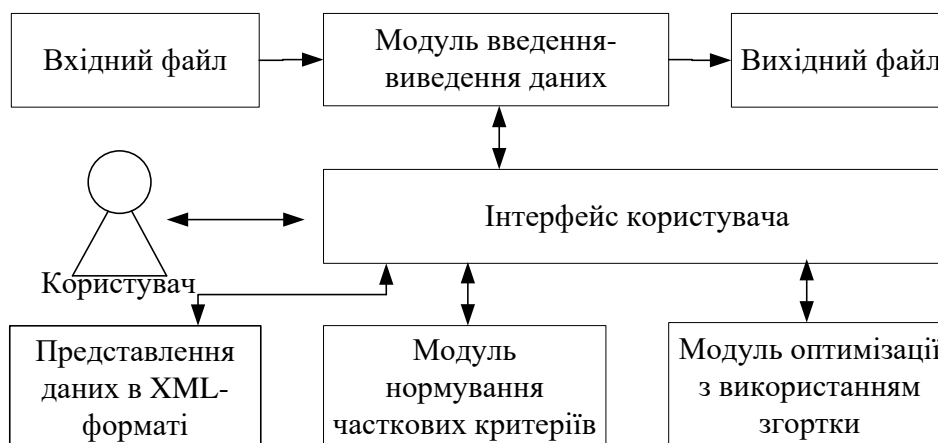


Рисунок 4.9 – Структура підсистеми розв’язання ЗБО з використанням адативної, мультиплікативної та максимінної і мінімаксної згортки

#### 4.5 Розробка нейроконтролера попереднього опрацювання даних

В процесі опрацювання даних від давачів в БСУЕП досить часто приходится стикатися з втратою даних, необхідністю реалізації апроксимації даних в наступні моменти часу, потребою в опрацюванні нечітких даних, тощо. В таких ситуаціях доцільно використати спеціальні засоби. Для прикладу, в даній дисертаційній роботі запропоновано опрацювати дані за допомогою мікроконтролера з реалізованою програмним чином нейромережею. Зрозуміло, що для більшості технічних задач таке поєднання є достатнім щодо швидкодії, а для систем реального часу нейронну мережу можна реалізувати на апаратному рівні.

##### 4.5.1 Розроблення структури інтелектуального засобу збору та опрацювання даних

Для прикладу розглянемо типовий інтелектуальний засіб опрацювання даних на прикладі системи управління інтелектуальною теплицею [159]. Інтелектуальна теплиця відповідає за підтримку мікроклімату і режиму освітлення для вирощування рослин згідно із заданими умовами. Відповідну

підсистему реалізуємо у формі нейроконтролера. Розроблено наступну структуру системи управління, яка включає у себе наступні компоненти (рис.4.10) мікроконтролер, який містить у собі програму управління та портовану нейромережу для аналізу даних і формування управлінських рішень.

Система управління включає такі датчики: датчик температури повітря для відслідковування температурного режиму в системі; датчик вологості повітря для відслідковування вмісту водяної пари у повітрі; датчик вологості ґрунту для відслідковування зволоженості ґрунту; датчик освітленості для відслідковування рівня зовнішнього освітлення та системний таймер для відслідковування часу доби.

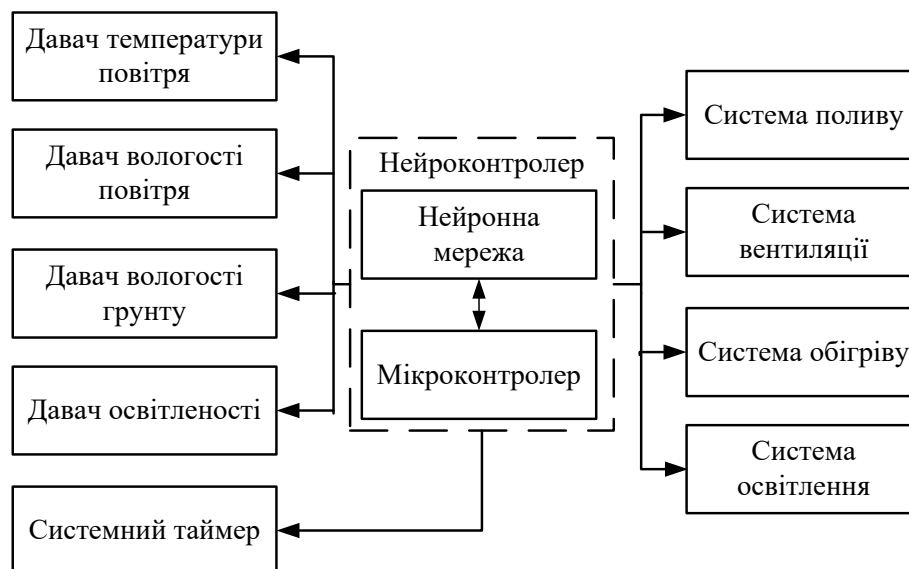


Рисунок 4.10 – Структура підсистеми управління інтелектуальною теплицею

Вищенаведені датчики дають змогу визначати зміни в середовищі теплиці. Для впливу на середовище теплиці використано актюатори. Зокрема, в розробленій системі управління інтелектуальною теплицею використано такі актюатори (виконуючі системи): підсистема поливу ґрунту; система вентиляції для зменшення температури та вологості всередині системи управління та очищення повітря; система підігріву повітря у системі; система освітлення, яка вмикається у разі недостатнього зовнішнього освітлення.

#### 4.5.2 Побудова моделей сценаріїв функціонування інтелектуального засобу збору та опрацювання даних

Сценарії роботи системи можна описати за допомогою наступних умов. Необхідно підтримувати температурний режим у системі та рівень освітлення у відведені для цього години. Введемо такі позначення:

$T$  – температура всередині системи;

$H_{земля}$  – вологість ґрунту;

$H_{повітря}$  – вологість повітря;

$L$  – рівень зовнішнього освітлення;

$D$  – час доби (0-24 години),

В технічному процесі функціонування інтелектуальної теплиці необхідно підтримувати наступні умови:

$$T_{\min} < T < T_{\max}, H_{земля\min} < H < H_{земля\max},$$

$$H_{повітря\min} < H < H_{повітря\max}, L_{\min} < L < L_{\max}, \text{ коли } D_{\min} < D < D_{\max},$$

де  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$  – мінімальне та максимальне значення температури;  
 $H_{земля\min}$ ,  $H_{земля\max}$  – мінімальне та максимальне значення вологості ґрунту;  
 $H_{повітря\min}$ ,  $H_{повітря\max}$  – мінімальне та максимальне значення вологості повітря;  
 $L_{\min}$ ,  $L_{\max}$  – мінімальне та максимальне значення рівня зовнішнього освітлення;  
 $D_{\min}$ ,  $D_{\max}$  – мінімальне та максимальне значення часу доби.

Для підтримки даного режиму необхідно розробити сценарії роботи системи, які описують необхідні дії для стабілізації умов всередині теплиці. Сценарії роботи включають наступні кроки, які описані та зведені у табл. 4.2.

Нейромережа отримує дані від датчиків температури, вологості ґрунту та датчика освітлення. Режим поливу і освітлення залежить від часу доби. Нейроконтролер формує керуючі сигнали для управління вентиляційними шахтами, обігрівачами, освітленням та поливом. Відповідно, нейромережа повинна мати 4-ри входи та 4-ри виходи.

### 4.5.3 Підготовка даних для навчання та тестування нейромережі

Для навчання нейромережі згенеровано множину даних, які описують значення давачів та очікувані значення актюаторів. Для навчання необхідно згенерувати достатню вибірку, яка буде відображати різноманітні стани у яких може перебувати система.

Для підготовки множини даних та її нормалізації було реалізовано програму на мові Java. Дана програма випадковим чином підбирає значення давачів та аналітично обчислює очікувані значення на актюаторах. Структура розробленого програмного забезпечення, яке реалізує нейромережу, наведено в Додатку Є.

Таблиця 4.2 –

#### Сценарії роботи інтелектуальної теплиці

<b>Значення умов</b>	<b>Дія</b>
Висока температура повітря	Увімкнути вентилятор вимкнути обігрівач
Низька температура повітря	Увімкнути обігрівач вимкнути вентилятор
Висока вологість повітря	Увімкнути вентилятор
Низька вологість повітря	
Висока вологість ґрунту	Вимкнути полив
Низька вологість ґрунту	Увімкнути полив
Високий рівень зовнішнього освітлення	
Низький рівень зовнішнього освітлення та час для активного освітлення рослин	Увімкнути зовнішнє освітлення
Поза зоною часу для активного освітлення	Вимкнути зовнішнє освітлення

Згенеровані набори даних необхідно нормалізувати таким чином, щоб значення були у діапазоні [0..1]. З цією метою на 2-му етапі програма запускає

модуль нормалізації та виводить фінальні результати, а приклад коду основного класу для нормалізація даних наведено наведено в Додатку Є1.

Приклад згенерованої навчальної вибірки для нейромережі, зображено на рис. 4.11. Програма знегерувала множину даних для навчання нейромережі:

0.13659352	0.5035774	0.01	6.49417	0.0	0.0	1.0	0.0
0.11472501	0.47745776	0.01	0.27352238	0.0	0.0	1.0	0.0
0.1738139	0.7501913	0.0	0.7836361	0.0	0.0	0.0	0.0
0.17271096	0.016949594	0.01	6.690731	0.0	0.0	1.0	1.0
0.1981485	0.69929206	0.01	7.609274	0.0	0.0	1.0	0.0
0.109491974	0.40013844	0.01	3.1834803	0.0	1.0	1.0	0.0
0.12645467	0.8741783	0.0	10.257828	0.0	0.0	0.0	0.0
0.098818235	0.98171824	0.0	0.45594692	0.0	1.0	0.0	0.0
0.16916224	0.31850475	0.01	6.956049	0.0	0.0	1.0	1.0

Рисунок 4.11 – Фрагмент навчальної вибірки

#### 4.5.4 Реалізація та навчання штучної нейронної мережі

Для проектування, навчання та перевірки роботи нейромережі використано середовище NeurophStudio. Це є безкоштовна програма для проектування нейрмереж різного типу. Дана програма надає змогу відслідковувати процес навчання, модифікувати структуру нейромережі, визначати множину тренувальних значень, візуалізувати результати навчання тощо. В якості нейромережі було вибрано багат шаровий парсептрон.

В середовищі NeurophStudio було спроектовано нейромережу, яка складається із 4-ох вхідних нейронів та одного балансуєчого, 6-ти внутрішніх нейронів та одного балансуєчого нейрона [160]. Вихідний шар містить 4-ри нейрони (рис.4.12).

Кожен із нейронів має зв'язки із сусідніми рівнями. Всередині середовища можна дослідити структура та зв'язки між нейронами. Для коректного навчання нейромережі рекомендовано розбивати множину на 2 частини. Перша частина використовується для навчання нейромережі, в той час як друга частина є контрольною множиною, за допомогою якої можна перевірити роботу нейромережі на нових даних. Приклад даних для навчання нейромережі

наведено в Додатку Є2. В даному випадку навчання нейромережі відбувається на 80% множини даних.

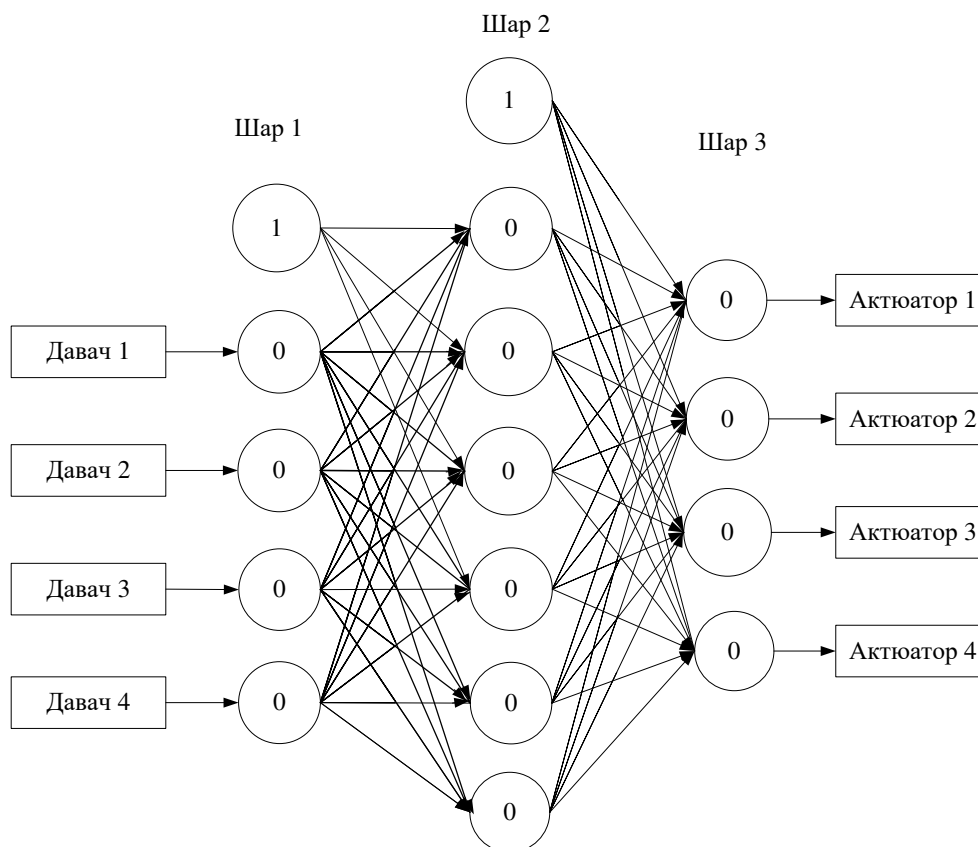


Рисунок 4.12 – Спроектвана структура нейромережі багатoshарового Персептрона

Навчання нейромережі багатoshарового Персептрона відбувається методом зворотного поширення похибки. Приклад залежності похибки навчання нейромережі від кількості ітерацій – наведено в Додатку Є3 та Додатку Є4.

Перевірка роботи нейромережі відбувається на 20% даних, які не були залучені під час процесу навчання. Це означає, що нейромережа не була спеціально натренована і результати роботи на даній вибірці дають можливість перевірити як функціонує нейромережа на незалежних даних. Фрагмент набору даних для перевірки результату навчання нейромережі наведено в Додатку Є5.



В результаті перевірки нейромережі отримано наступні результати (див. Додаток Є6): значення середньої квадратичної похибки є 0.032.

Після цього можливо експортувати навчену нейромережу для реалізації нейроконтролера.

#### 4.6 Програмно-апаратна реалізація базового нейроконтролера

Розроблення базового нейроконтролера включає дві основні частини, а саме: апаратну та програмну.

##### 4.6.1 Особливості апаратної реалізації нейроконтролера

В роботі розроблено структурну схему апаратної частини базового нейроконтролера, яка включає наступні складові:

- мікроконтролер STM32-F103C8T6, який базується на ядрі: ARM 32 Cortex-M3 із робочою частотою 72 МГц, об'ємом 64 Кб пам'яті під програму та 20Кб флеш пам'яті;

- системний таймер DS1307, який необхідний для визначення часу доби;

- для відслідковування даних про мікроклімат та освітлення необхідно використано ряд датчиків:

- датчик температури DS18B20, що дає змогу відслідковувати температуру у діапазоні від -10\*С до 85\*С із похибкою 0.5\*С;

- датчик температури та вологості DHT11, який дає змогу відслідковувати вологість повітря у діапазоні від 20% до 80% з похибкою 5%. Також датчик надає змогу відслідковувати температуру у діапазоні від 0\*С до 60\*С з похибкою 2%. Датчик DS18B20 дає значення із меншою похибкою, тому його рекомендовано використовувати на відміну DHT11;

- датчик вологості ґрунту, що замірює провідність ґрунту та надає дані у діапазоні 0-5В залежно від встановленого порогового значення;

- фоторезистор, на базі якого організовано давач освітленості. Для цього використано допоміжний балансуєчий резистор. Під час подавання напруги на послідовно з'єднані резистори можна відслідковувати зміну відношення напруги між балансуєчим резистором та фоторезистором в залежності від зовнішнього освітлення.

- в якості виконуючих пристроїв використані світлодіоди, які підключенні через 4-ох каналне реле. Реле використовується для того, щоб замикати живлення на актюаторах при наявності малопотужного керуючого сигналу від мікроконтролера. Для демонстрації під час замикання контактів повинний загорятися світлодіод. Кожен із світлодіодів відповідає за одну із систем поливу, вентиляції, обігріву та освітлення.

Для проектування апаратної реалізації було використано середовище Fritzing. Середовище розробки дає змогу синтезувати схему електричну принципову і схему підключення компонентів на монтажній платі. Схема електрична принципова зображає структуру портів кожного із елементів та схему підключення компонентів між собою.

#### 4.6.2 Програмна реалізація нейроконтролера

Програмна реалізація нейроконтролера включає у себе декілька модулів, кожен із яких відповідає за певний аспект роботи нейроконтролера. Програмне забезпечення складається із наступних модулів:

Модуль ініціалізації системи – відповідає за: попередню ініціалізацію системи; ініціалізацію портів для роботи із давачами, актюаторами та системних таймером; завантаження початкових даних.

Модуль роботи із периферією – відповідає за: роботу з давачами, яка полягає у періодичному зчитуванні даних з давачів; роботу із системним таймером, яка полягає у встановленні початкового часу та періодичного

зчитування поточного часу доби; роботу з актюаторами, яка полягає у передачі керуючих сигнали на реле для зміни стану актюаторами.

Модуль опрацювання даних на основі нейромережі – відповідає за: ініціалізацію нейромережі, який полягає у завантаження розмірності нейромережі, типу функції нейронів та матриць із ваговими коефіцієнтами; введення вхідних даних у нейромережу; симуляцію роботи нейромережі; виведення вихідних даних для формування керуючих команд для управління актюаторами.

Основним завданням даного модуля є симуляція роботи нейромережі. З цією метою – реалізовано підпрограму, яка проводить послідовні обчислення значення кожного із нейронів з урахуванням типу функції нейрона та звязків між нейронами. Наприкінці роботи підпрограми є сформовані значення кожного із елементів.

Алгоритм роботи нейроконтролера є наступним:

Крок 1: Ініціалізація системи.

Крок 2: Ініціалізація портів.

Крок 3: Завантаження початкових даних.

Крок 4: Очікування на оператор переривання для запуску основного циклу. Запустився оператор переривань? Так- перехід на крок 5. Ні — перехід на крок 4.

Крок 5: Читати дані з давача температури.

Крок 6: Читати дані з давача вологості.

Крок 7: Читати дані з давача освітленості.

Крок 8: Читати дані про поточний час доби.

Крок 9: Ввести вхідні дані у нейромережу.

Крок 10: Запуск підпрограми для обчислення значень нейромережі.

Крок 11: Отримати вхідні дані з нейромережі.

Крок 12: Сформувати керуючі сигнали.

Крок 13: Надіслати керуючі сигнали на реле.

Крок14: встановити оператор переривань на 1 секунду, перейти на крок 4.

Блок-схему алгоритму роботи нейроконтролера подано в Додатку Є7. Основною особливістю роботи нейроконтролера є його циклічність роботи. Оскільки немає потреби часто опитувати та оновлювати стан системи, то використано оператор переривань, який зупиняє основний цикл виконання програми та обмежує частоту виконання основного циклу.

Під час виконання основного циклу, викликається підпрограма для симуляції роботи нейромережі. На основі її відповіді формуються команди для управління актюаторами. Алгоритм роботи підпрограми для симуляції роботи нейромережі подано в Додатку Є8:

Крок 1: Перемістити лічильник на перший нейрон.

Крок 2: Чи досягнуто кінця нейромережі? Так — перехід на крок 7, Ні — перехід на крок 3.

Крок 3: Сформувати список вхідних дендритів.

Крок 4: Обчислити суму вхідних сигналів нейрона.

Крок 5: Обчислити вихідний сигнал нейрона у залежності від його типу.

Крок 6: Перемістити лічильник на наступний нейрон. Перехід на крок 2.

Крок 7: Завершити роботу підпрограми.

Підпрограма відповідає за обчислення значень кожного із нейронів системи. У якості вхідних даних підпрограма отримує покази давачів та системного таймера. У якості вихідних даних підпрограма виводить стан у який варто перевести кожен із актюаторів (увімкнути/ вимкнути).

#### 4.7 Результати автоматизованого синтезу засобу збору та опрацювання даних на базі мікроконтролера для системи управління енергоефективністю підприємства

Згідно з наведеним вище алгоритмом синтезу, синтезуємо пристрій, який має включати мікроконтролер, давач температури, актюатор (нагрівач) та модуль Bluetooth для реалізації зв'язку.

На першому етапі синтезу необхідно вибрати множину базових елементів кожного типу, які відповідають початковим умовам (технічному завданню).

Перелік усіх доступних мікроконтролерів наведено нижче (рис.4.13):

*price=300.0 frequency=16.0 internalMemory=16.0 id=1.0,*  
*price=939.0 frequency=16.0 internalMemory=32.0 id=2.0,*  
*price=1597.0 frequency=16.0 internalMemory=256.0 id=3.0,*  
*price=138.0 frequency=16.0 internalMemory=256.0 id=4.0.*

З наведеного списку необхідно вибрати ті елементи, які відповідають вимогам ТЗ. Приклад запуску вимоги ТЗ зображено нижче:

KEY\_PRICE, min:0, max:1500, SelectionCondition.DECREASE\_BETTER

KEY\_FREQUENCY, min:16, max:32, SelectionCondition.INCREASE\_BETTER

KEY\_INTERNAL\_MEMORY, min:16, max:256,

SelectionCondition.INCREASE\_BETTER

В результаті отримуємо наступний список базових елементів:

*price=300.0 frequency=16.0 internalMemory=16.0 id=1.0,*  
*price=939.0 frequency=16.0 internalMemory=32.0 id=2.0,*  
*price=138.0 frequency=16.0 internalMemory=256.0 id=4.0.*

Для кожного із варіантів синтезованої структури необхідно обчислити значення цільової функції (адитивна згортка). Значення кожного із параметрів, порівнюється із діапазоном обмежень. Вагові коефіцієнти використовуються для вказування ваги кожного із компонент.

*param1: 0.74278134,*

*param2: 0.37139067,*

*param3: 0.55708605.*

По завершенню обчислень значень цільових функції, варіанти необхідно сортувати по спаданню.

*1.2315315 -> price=138.0 frequency=16.0 internalMemory=256.0 id=4.0,*

*0.59422505 -> price=300.0 frequency=16.0 internalMemory=16.0 id=1.0,*

*0.31493926 -> price=939.0 frequency=16.0 internalMemory=32.0 id=2.0.*

Наступний крок передбачає вибір давачів. Перелік всіх доступних давачів температури наведено нижче (див.рис. 4.14):

*price=29.0 minValue=0.0 maxValue=50.0 id=1.0,*  
*price=39.0 minValue=0.0 maxValue=50.0 id=2.0,*  
*price=99.0 minValue=-40.0 maxValue=80.0 id=3.0,*  
*price=112.0 minValue=-40.0 maxValue=80.0 id=4.0,*  
*price=49.0 minValue=-10.0 maxValue=85.0 id=5.0,*  
*price=24.0 minValue=-10.0 maxValue=85.0 id=6.0,*  
*price=44.0 minValue=-10.0 maxValue=85.0 id=7.0,*  
*price=47.0 minValue=-10.0 maxValue=85.0 id=8.0.*

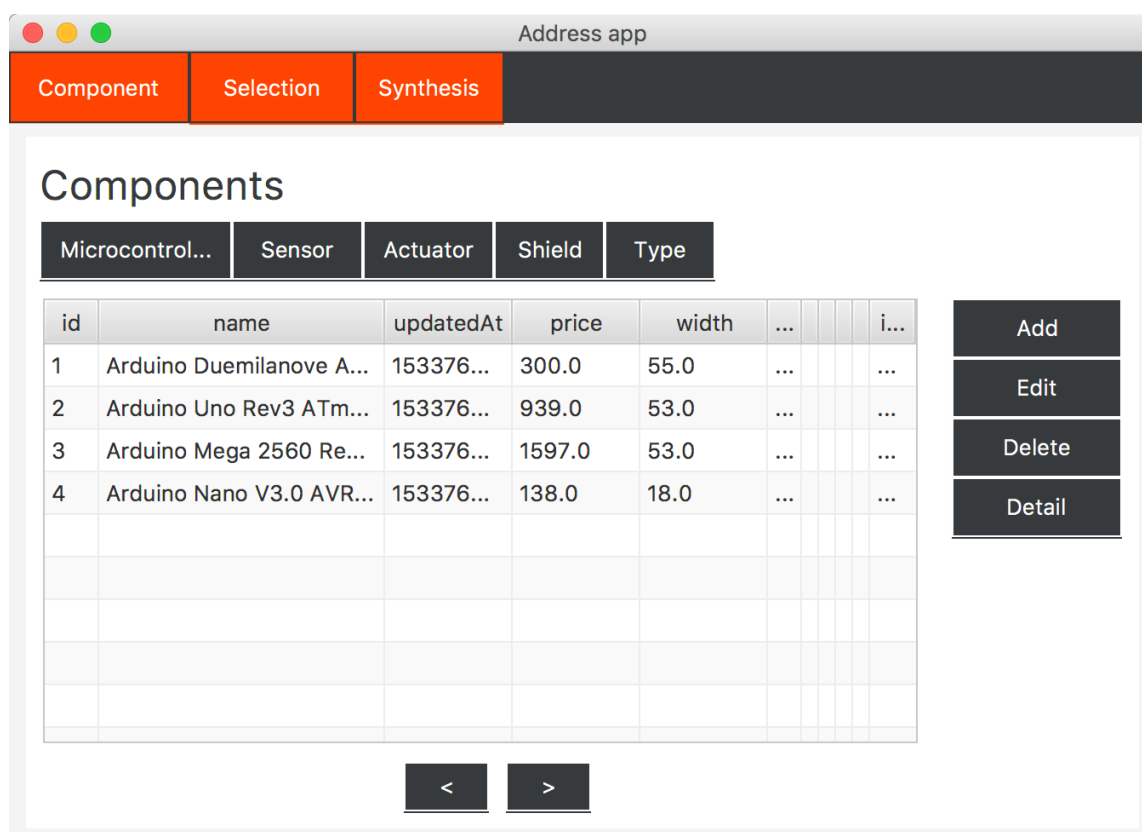


Рисунок 4.13 – Приклад меню з переліком доступних мікроконтролерів із бази даних системи синтезу

Наступний крок передбачає вибір елементів, які відповідають обмеженням ТЗ:

*KEY\_PRICE*, min:0, max:1500, SelectionCondition.*DECREASE\_BETTER*

*KEY\_MIN\_VALUE*, min:-50, max:5, SelectionCondition.*INCREASE\_BETTER*

*KEY\_MAX\_VALUE*, min:60, max:150, SelectionCondition.*INCREASE\_BETTER*

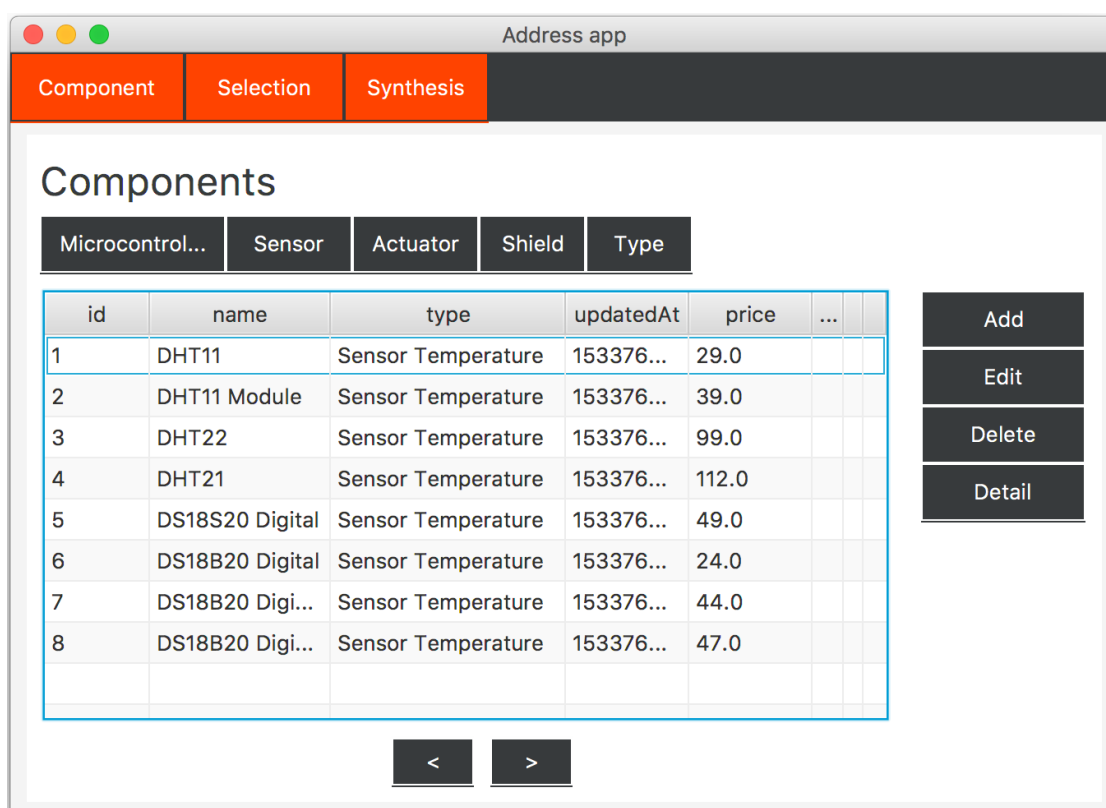


Рисунок 4.14 – Приклад меню з переліком доступних датчиків температури

Результати вибору датчиків зображено нижче:

*price=99.0 minValue=-40.0 maxValue=80.0 id=3.0,*

*price=112.0 minValue=-40.0 maxValue=80.0 id=4.0,*

*price=49.0 minValue=-10.0 maxValue=85.0 id=5.0,*

*price=24.0 minValue=-10.0 maxValue=85.0 id=6.0,*

*price=44.0 minValue=-10.0 maxValue=85.0 id=7.0,*

*price=47.0 minValue=-10.0 maxValue=85.0 id=8.0.*

Для кожного із варіантів відібраних датчиків необхідно обчислити значення цільової функції. Значення кожного із параметрів, порівнюється із діапазоном обмежень. Вагові коефіцієнти використовуються для вказування ваги кожного із компонент. Отримані значення мають такі величини:

*param1: 0.8728715,*

*param2: 0.43643576,*

*param3: 0.21821788.*

По завершенню обчислень значень цільових функції варіанти сортуються по спаданню і отримуємо такі результати:

*1.2369295 -> price=24.0 minValue=-10.0 maxValue=85.0 id=6.0,*

*1.2252913 -> price=44.0 minValue=-10.0 maxValue=85.0 id=7.0,*

*1.2235456 -> price=47.0 minValue=-10.0 maxValue=85.0 id=8.0,*

*1.2223817 -> price=49.0 minValue=-10.0 maxValue=85.0 id=5.0,*

*0.9431068 -> price=99.0 minValue=-40.0 maxValue=80.0 id=3.0,*

*0.9355419 -> price=112.0 minValue=-40.0 maxValue=80.0 id=4.0.*

Наступні етапи синтезу передбачають вибір актюаторів. Зокрема, перелік усіх доступних актюаторів обігрівачів (див. рис. 4.15)

*price=650.0 performance=500.0 id=1.0,*

*price=1750.0 performance=2000.0 id=2.0,*

*price=950.0 performance=1000.0 id=3.0,*

*price=90.0 performance=100.0 id=4.0,*

*price=70.0 performance=70.0 id=5.0,*

*price=55.0 performance=50.0 id=6.0,*

*price=1250.0 performance=1500.0 id=7.0.*

Приклад вибору актюаторів, які відповідають наступним обмеженням ТЗ:

KEY\_PRICE, min:0, max:1500, SelectionCondition.DECREASE\_BETTER

KEY\_PERFORMANCE, min:100, max:1500,

SelectionCondition.INCREASE\_BETTER

Після відбору залишилися компоненти, а саме:



*price=650.0 performance=500.0 id=1.0,*  
*price=950.0 performance=1000.0 id=3.0,*  
*price=90.0 performance=100.0 id=4.0,*  
*price=1250.0 performance=1500.0 id=7.0.*

Address app

Component Selection **Synthesis**

### Components

Microcontrol... Sensor Actuator Shield Type

id	name	type	updatedAt	price	perfor...
1	Heater 500W	Actuator ...	15337630...	650.0	500.0
2	Heater 2000W	Actuator ...	15337630...	1750.0	2000.0
3	Heater 1000W	Actuator ...	15337630...	950.0	1000.0
4	Light 100W	Actuator ...	15337630...	90.0	100.0
5	Light 70W	Actuator ...	15337630...	70.0	70.0
6	Light 50W	Actuator ...	15337630...	55.0	50.0
7	Heater 1500W	Actuator ...	15337630...	1250.0	1500.0

Add  
Edit  
Delete  
Detail

< >

Рисунок 4.15 – Перелік доступних актюаторів обігрівачів

Для кожного із варіантів обчислюємо значення цільової функції. Значення кожного із параметрів, порівнюється із діапазоном обмежень. Вагові коефіцієнти використовуються для вказування ваги кожного із компонент.

param1: 0.94868326,

param2: 0.31622776.

По завершенню обчислень значень цільових функцій сортуються по спаданню.

*0.8917623 -> price=90.0 performance=100.0 id=4.0,*

*0.62793803 -> price=650.0 performance=500.0 id=1.0,*

*0.55113983 -> price=950.0 performance=1000.0 id=3.0,*

*0.47434163 -> price=1250.0 performance=1500.0 id=7.0.*

Аналогічно реалізуємо операцію вибору Bluetooth модуля зв'язку.

Перелік усіх доступних Bluetooth модулів зв'язку (рис. 4.16):

id	name	t...	updatedAt	price
1	Bluetooth HC-08	...	1533763039...	156.0
2	Bluetooth HC-05 Mas...	...	1533763039...	112.0
3	Bluetooth HC-06	...	1533763039...	108.0
4	Bluetooth HC-05	...	1533763039...	122.0
5	Bluetooth 4.0 module	...	1533763039...	146.0

Рисунок 4.16 - Перелік доступних Bluetooth модулів зв'язку

*price=156.0 id=1.0,*

*price=112.0 id=2.0,*

*price=108.0 id=3.0,*

*price=122.0 id=4.0,*

*price=146.0 id=5.0.*

Приклад вибору елементів, які відповідають обмеженням ТЗ:

KEY\_PRICE, min:0, max:150, SelectionCondition.DECREASE\_BETTER

Приклад списку вибраних елементів:

*price=112.0 id=2.0,*

*price=108.0 id=3.0,*

*price=122.0 id=4.0,*

*price=146.0 id=5.0.*

Для кожного із варіантів обчислюємо значення цільової функції. Значення кожного із параметрів, порівнюється із діапазоном обмежень. Вагові коефіцієнти використовуються для вказування ваги кожного із компонент.

*param1: 1.0.*

По завершенню обчислень значень цільових функції варіанти сортуються по спаданню:

*0.28 -> price=108.0 id=3.0,*

*0.25333333 -> price=112.0 id=2.0,*

*0.18666667 -> price=122.0 id=4.0,*

*0.02666667 -> price=146.0 id=5.0.*

На другому етапі синтезу системи необхідно згенерувати варіанти поєднання базових елементів у єдину систему так, щоб було використано один мікроконтролер, один давач температури, один обігрівач та один Bluetooth модуль зв'язку.

На початку множина відібраних базових елементів складається з: 3-ох відібраних мікроконтролерів; 6-ох відібраних давачів температури; 4-ох актюаторів обігрівачів; 4-ох Bluetooth модулів зв'язку.

Виконуємо операцію генерування варіантів поєднання елементів у типову структуру. У даному випадку відбувається повний перебір варіантів поєднання (288 варіантів). Фрагмент згенерованих альтернатив варіантів зображено нижче:

№

*0 0 1.2315315 4.0 1 1.2369295 6.0 2 0.8917623 4.0 3 0.28 3.0,*

*1 0 1.2315315 4.0 1 1.2369295 6.0 2 0.8917623 4.0 3 0.25333333 2.0,*

*2 0 1.2315315 4.0 1 1.2369295 6.0 2 0.8917623 4.0 3 0.18666667 4.0,*

3 0 1.2315315 4.0 1 1.2369295 6.0 2 0.8917623 4.0 3 0.026666667 5.0,  
 4 0 1.2315315 4.0 1 1.2369295 6.0 2 0.62793803 1.0 3 0.28 3.0,  
 5 0 1.2315315 4.0 1 1.2369295 6.0 2 0.62793803 1.0 3 0.25333333 2.0,  
 6 0 1.2315315 4.0 1 1.2369295 6.0 2 0.62793803 1.0 3 0.18666667 4.0,  
 7 0 1.2315315 4.0 1 1.2369295 6.0 2 0.62793803 1.0 3 0.026666667 5.0,  
 8 0 1.2315315 4.0 1 1.2369295 6.0 2 0.55113983 3.0 3 0.28 3.0,  
 9 0 1.2315315 4.0 1 1.2369295 6.0 2 0.55113983 3.0 3 0.25333333 2.0,  
 10 0 1.2315315 4.0 1 1.2369295 6.0 2 0.55113983 3.0 3 0.18666667 4.0,  
 ...  
 278 0 0.31493926 2.0 1 0.9355419 4.0 2 0.62793803 1.0 3 0.18666667 4.0,  
 279 0 0.31493926 2.0 1 0.9355419 4.0 2 0.62793803 1.0 3 0.026666667 5.0,  
 280 0 0.31493926 2.0 1 0.9355419 4.0 2 0.55113983 3.0 3 0.28 3.0,  
 281 0 0.31493926 2.0 1 0.9355419 4.0 2 0.55113983 3.0 3 0.25333333 2.0,  
 282 0 0.31493926 2.0 1 0.9355419 4.0 2 0.55113983 3.0 3 0.18666667 4.0,  
 283 0 0.31493926 2.0 1 0.9355419 4.0 2 0.55113983 3.0 3 0.026666667 5.0,  
 284 0 0.31493926 2.0 1 0.9355419 4.0 2 0.47434163 7.0 3 0.28 3.0,  
 285 0 0.31493926 2.0 1 0.9355419 4.0 2 0.47434163 7.0 3 0.25333333 2.0,  
 286 0 0.31493926 2.0 1 0.9355419 4.0 2 0.47434163 7.0 3 0.18666667 4.0,  
 287 0 0.31493926 2.0 1 0.9355419 4.0 2 0.47434163 7.0 3 0.026666667 5.0.

Для кожного із варіантів обчислюємо загальне значення цільової функції. Враховується, значення цільової функції для кожного із синтезованих засобів окремо, що зображено нижче:

0.9100558 -> 0 1.2315315 4.0 1 1.2369295 6.0 2 0.8917623 4.0 3 0.28 3.0,  
 0.9071463 -> 0 1.2315315 4.0 1 1.2252913 7.0 2 0.8917623 4.0 3 0.28 3.0,  
 0.90670985 -> 0 1.2315315 4.0 1 1.2235456 8.0 2 0.8917623 4.0 3 0.28 3.0,  
 0.90641886 -> 0 1.2315315 4.0 1 1.2223817 5.0 2 0.8917623 4.0 3 0.28 3.0,  
 0.90338916 -> 0 1.2315315 4.0 1 1.2369295 6.0 2 0.8917623 4.0 3 0.25333333 2.0,  
 0.9004796 -> 0 1.2315315 4.0 1 1.2252913 7.0 2 0.8917623 4.0 3 0.25333333 2.0,  
 0.9000432 -> 0 1.2315315 4.0 1 1.2235456 8.0 2 0.8917623 4.0 3 0.25333333 2.0,  
 0.8997522 -> 0 1.2315315 4.0 1 1.2223817 5.0 2 0.8917623 4.0 3 0.25333333 2.0,

0.8867225 -> 0 1.2315315 4.0 1 1.2369295 6.0 2 0.8917623 4.0 3 0.18666667 4.0,  
 0.88381296 -> 0 1.2315315 4.0 1 1.2252913 7.0 2 0.8917623 4.0 3 0.18666667 4.0,  
 ...  
 0.49643025 -> 0 0.31493926 2.0 1 0.9431068 3.0 2 0.47434163 7.0 3 0.25333333 2.0,  
 0.49453902 -> 0 0.31493926 2.0 1 0.9355419 4.0 2 0.47434163 7.0 3 0.25333333 2.0,  
 0.47976357 -> 0 0.31493926 2.0 1 0.9431068 3.0 2 0.47434163 7.0 3 0.18666667 4.0,  
 0.47816268 -> 0 0.31493926 2.0 1 0.9431068 3.0 2 0.62793803 1.0 3 0.02666667 5.0,  
 0.47787237 -> 0 0.31493926 2.0 1 0.9355419 4.0 2 0.47434163 7.0 3 0.18666667 4.0,  
 0.47627145 -> 0 0.31493926 2.0 1 0.9355419 4.0 2 0.62793803 1.0 3 0.02666667 5.0,  
 0.45896313 -> 0 0.31493926 2.0 1 0.9431068 3.0 2 0.55113983 3.0 3 0.02666667 5.0,  
 0.4570719 -> 0 0.31493926 2.0 1 0.9355419 4.0 2 0.55113983 3.0 3 0.02666667 5.0,  
 0.43976358 -> 0 0.31493926 2.0 1 0.9431068 3.0 2 0.47434163 7.0 3 0.02666667 5.0,  
 0.43787235 -> 0 0.31493926 2.0 1 0.9355419 4.0 2 0.47434163 7.0 3 0.02666667 5.0.

Відповідно, найбільше значення цільової функції є для варіанту поєднання 4-го мікроконтролера, 6-го датчика температури, 4-го актюатора обігрівача та 3-го Bluetooth модуля зв'язку. Отже, запропонована система (засіб опрацювання даних) складається з мікроконтролера Arduino Nano V3, датчика температури DS18B20 Digital, обігрівача-лампи Light 100W та модуля зв'язку Bluetooth HC-06.

#### 4.8 Дослідження ефективності розв'язання задач структурного синтезу засобів збору та опрацювання даних

Задля підвищення ефективності роботи системи синтезу було досліджено динаміку роботи системи в залежності від різних вхідних параметрів. Основним параметром дослідження є ефективність роботи системи залежно від кількості параметрів синтезу.

В дисертаційній роботі проведено серію симуляцій роботи системи синтезу. Для досліду генерувалися різні варіанти засобів збору та опрацювання даних із різною кількістю елементів від 2-ох до 12-ти базових елементів. Під

час кожної із симуляцій роботи розроблювальної системи синтезу вибирався один мікроконтролер, який був основним елементом системи. Допоміжні елементи вибиралися із переліку давачів, актюаторів та модулів розширення. Зокрема для одного з варіантів синтезу було вибрано давачі температури, освітлення, диму; актюатори освітлення та обігріву, а також модулі Bluetooth комунікації та LCD екрани.

Під час кожної із генерацій синтезу обчислюється загальна кількість варіантів поєднання елементів, кількість варіантів, які фільтруються по сумісності між інтерфейсами та заміряється час роботи системи синтезу. Симуляцію проводили на комп'ютері macbook Pro 2015 із процесором Core i7 та 16 Гб оперативної пам'яті. Приклад отриманих даних представлений у таблиці 4.3.

Одним із важливих параметрів роботи системи синтезу є залежність кількості варіантів поєднання базових елементів від кількості параметрів пошуку. Система синтезу містить додатковий фільтр, який дозволяє відсіювати ті варіанти, які не є сумісними по кількості доступних інтерфейсів. Тому, в роботі, акцент був поставлений на дослідження ефективності роботи саме даного методу.

Графік залежності загальної кількості варіантів поєднання та кількості відфільтрованих варіантів зображено на рис.4.17. Згідно з отриманими результатами видно, що метод фільтрації елементів по сумісності по інтерфейсами починає діяти тоді, коли зростає кількість параметрів синтезу системи. Відповідно чим з більшої кількості елементів повинна складатися система, тим більше портів мікроконтролера залучається. Як наслідок у багатьох варіантах відсутні вільні порти і систему не можна підключити до єдиного мікроконтролера. Відповідно із зростанням кількості елементів зростає відсоток варіантів, які відсіюються.

Одним із важливих параметрів роботи системи синтезу є складність обчислень під час її роботи. Важливим параметром у даному випадку є часу роботи системи в залежності від кількості варіантів поєднання елементів. Для

цього було проведено серію вичислювальних експериментів та враховано загальний час роботи (рис.4.18). З отриманих даних можна зробити висновок, що час роботи системи лінійно залежить від кількості варіантів поєднання компонент. Відповідно, складність роботи системи є  $O(n)$ , де  $n$  - кількість варіантів поєднання елементів.

Таблиця 4.3

Залежність часу роботи системи синтезу від кількості параметрів симуляції

Кількість	Повний перебір	Відсіяні варіанти	Різниця	Економія обчислення	Час (мілісекунд)
2	49	49	0	0	1
3	196	196	0	0	2
4	588	588	0	0	3
5	1764	1764	0	0	7
6	12348	12348	0	0	28
7	24696	24696	0	0	42
8	49392	49392	0	0	63
9	148176	148176	0	0	217
10	296352	260064	36288	12.24489796	454
11	2074464	1312416	762048	36.73469388	6546
12	6223392	3701376	2522016	40.52478134	20797

Наступною важливою характеристикою роботи системи синтезу є час роботи системи синтезу в залежності від кількості параметрів синтезу (рис.4.19). У випадку, якщо обчислити  $\ln(\text{time})$ , то буде отримано результати, які зображено на рис 4.20. З отриманих даних можна зробити висновок, що логарифм часу роботи системи лінійно залежить від кількості вхідних даних.

Відповідно складність роботи системи є  $O(e^n)$ , де  $n$  - кількість параметрів синтезу.

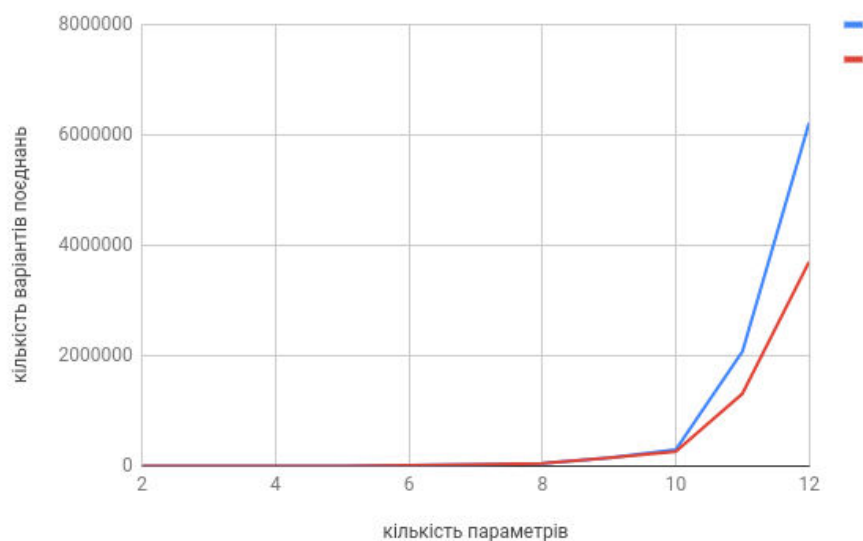


Рисунок 4.17 – Залежність варіантів поєднання елементів (синій - загальна кількість варіантів поєднання. Червоний - кількість варіантів відсіяних фільтром сумісності по портам)

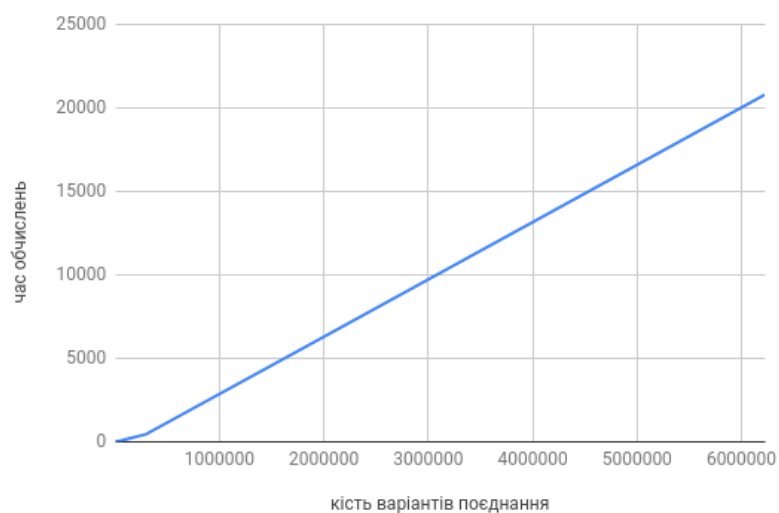


Рисунок 4.18 – Залежність часу роботи системи синтезу від кількості варіантів поєднання елементів



Оскільки, час роботи системи зростає по експоненті, то важливим питанням є можливість зменшити загальну кількість обчислень за рахунок відсікання варіантів із найгіршими параметрами (згідно з значенням цільової функції).

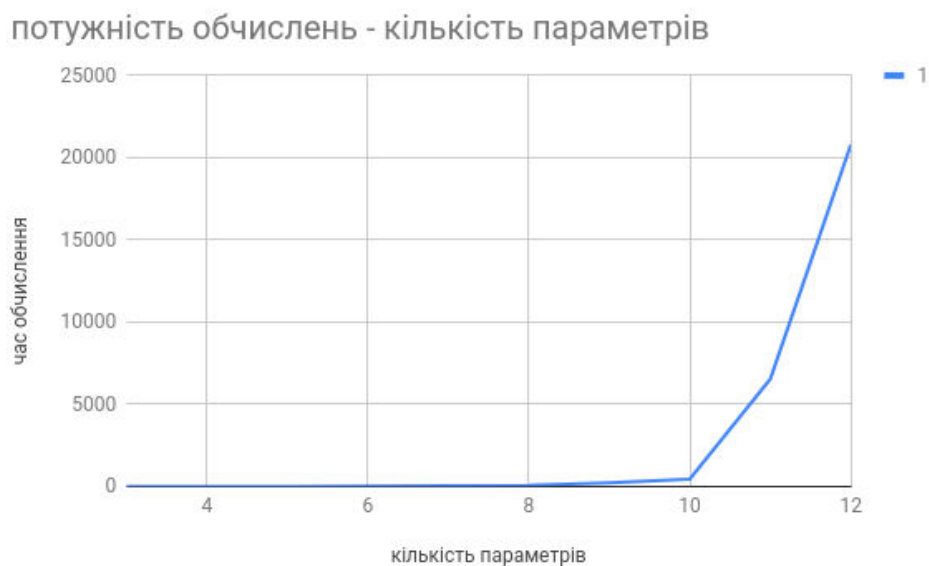


Рисунок 4.19 – Залежність часу обчислень варіантів синтезу проектованої системи від кількості параметрів

Для досягнення даної цілі можна використовувати елітарну стратегію, коли основні позиції під час синтезу займають елементи, які були кращими під час роботи системи вибору елементів.

Для дослідження цієї гіпотези було проведено серію вичислювальних експериментів, коли порівнювалися результати роботи системи синтезу на повному наборі вхідних даних та на зменшеному наборі даних, коли використовувати елементи вибірки, які мають кращі значення цільової функції.

Для оцінювання фактору стиснення вибірки підбиралися різні значення стиснення, які показували скільки % від початкової вибірки буде використано.

Згідно із отриманими результатами, що зображено на рис. 4.21, прослідковується залежність, яка дає змогу стверджувати, що достатньо використовувати топ 60% вибірки, щоб отримати такі ж результати.

Відповідно, для економії ресурсів можливо зменшувати початкову вибірку елементів задля пришвидшення обчислювань.

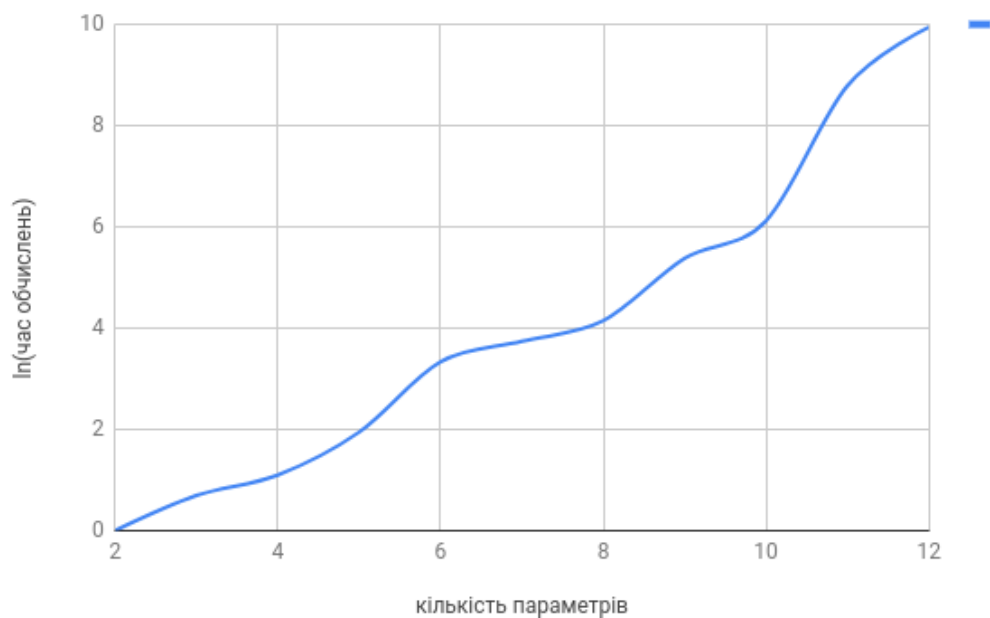


Рисунок 4.20 – Залежність логарифму часу обчислень варіантів синтезу системи від кількості параметрів

Таблиця 4.4

Залежність співпадіння результатів методів пошуку від відсотку застосування кращих елементів

Відсоток відсікання	Кількість параметрів				
	8	9	10	11	12
90	100	100	100	100	100
80	100	100	100	100	100
70	100	100	100	0	0
60	100	100	100	0	0
50	54	54	54	0	0
40	8	8	8	0	0

Метод фільтрації варіантів синтезу через сумісність по інтерфейсам у поєднанні із підходами методу Парето може підвищити ефективності роботи системи синтезу. Оскільки загальний (значення цільової функції) обчислюється за рахунок використання адитивної та мультиплікативної функції, то елементи із кращими параметрами генерують варіанти із більшим значенням узагальненої цільової функції.

Якщо відсікати параметри згідно із сумісність по інтерфейсам, то можна отримати хороші варіанти із використанням малої кількості обчислень. Відповідно даний підхід дозволяє використовувати меншу кількість обчислень та збільшити кількість параметрів з яких повинна складатися синтезована система.

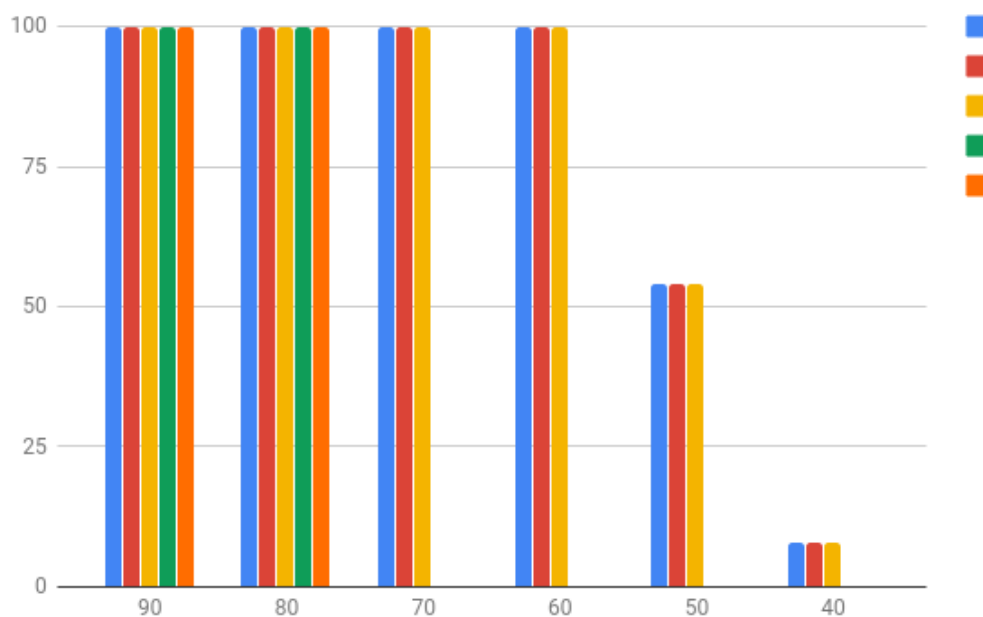


Рисунок 4.21 – Ефективність пошуку базових елементів залежно від стратегії відсікання найгірших елементів

#### 4.9 Висновки до розділу 4

1. Розроблено структуру та алгоритм функціонування системи синтезу елементів системи управління енергоефективністю технологічного процесу на

підприємстві, яка ґрунтується на модульному принципі та включає наступні складові: підпрограму для вибору елементної бази згідно із техніко-економічними показниками; підпрограму для синтезу структури компонентів для системи управління енергоефективністю підприємства, яка ґрунтується на модульному принципі та включає наступні складові: підпрограму для вибору елементної бази згідно з техніко-економічними показниками, підпрограму для синтезу структури компонентів для БСУЕП.

2. Розроблено програмне та інформаційне забезпечення системи синтезу елементів системи управління енергоефективністю підприємства, яка базується на базі даних SQLite та написана на мові Java. Дана програма є кросплатформова і може працювати на різних операційних системах.

3. Розроблено структуру, сценарії роботи нейроконтролера для управління інтелектуальною теплицею.

4. Розроблено програмне та технічне забезпечення нейроконтролера, яке базується на мікроконтролері STM32F103 і використовується у якості центрального модуля нейроконтролера. Описано структура нейроконтролера та алгоритми його роботи. Програмне забезпечення реалізовано на мові C.

5. Розроблено імітаційна модель системи автоматизованого синтезу елементів системи управління енергоефективністю регіону, яка використовує вільновживане середовище Octave і дає змогу дослідити та перевірити функціонування методу вибору елементної бази та синтезу компонентів управління енергоефективністю технологічного процесу на підприємстві.

6. Наведено результати синтезу базового елемента, який складається з мікроконтролера, давача температури, обігрівача та модуля зв'язку. Було згенеровано 284 альтернативи, з яких було вибрано варіант з більшим значення цільової функції. Окрім того, наведено результати синтезу складових системи управління енергоефективністю підприємства з врахуванням інтерфейсів базових елементів та результати ефективності розв'язання задачі структурного синтезу.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, на основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень, розв'язано актуальне наукове завдання розроблення та вдосконалення моделей, методів і синтез засобів збору та опрацювання даних багаторівневої системи управління енергоефективністю підприємства з високими техніко-економічними характеристиками.

1. Проаналізовано інформаційні технології збору та опрацювання даних в багаторівневих системах управління енергоефективністю підприємства та визначено основні напрямки розроблення апаратно-програмних засобів для синтезу систем збору і опрацювання даних на підприємстві, що дало змогу сформулювати задачі дисертаційного дослідження.

2. Розроблено моделі динамічного аналізу функціонування засобів інформаційної технології збору та опрацювання даних в багаторівневих системах управління енергоефективністю підприємства, які за рахунок використання теорії простих, кольорових та ієрархічних мереж Петрі забезпечують прийняття рішення про відповідність функціонування системи згідно з вимогами технічного завдання.

3. Удосконалено метод синтезу засобів збору і опрацювання даних в системах управління енергоефективністю підприємства, який за рахунок врахування інтерфейсів, вимог технічного завдання та використання інтегрального критерію ефективності компонентів, забезпечує зменшення апаратних та часових затрат від 10 до 40 % та синтез засобів багаторівневих систем з високими техніко-економічними показниками.

4. Удосконалено метод безконфліктного обміну даними, який за рахунок узгодження інтенсивності надходження даних з інтенсивністю доступу до засобів обміну, забезпечує визначення мінімальної швидкодії пам'яті для синтезу засобів обміну в реальному часі, що зменшує вартість засобів обміну та енергоспоживання.

5. Удосконалено метод обчислення сигналу постсинаптичного збудження нейронних елементів в штучних нейронних мережах, який ґрунтується на паралельному таблично-алгоритмічному обчисленні скалярного добутку з використанням двох і більше таблиць та забезпечує зменшення в два і більше разів час опрацювання технологічних даних.

6. Розроблено структуру, програмне та інформаційне забезпечення системи синтезу засобів збору і опрацювання даних в БСУЕП, що дає змогу автоматизувати процес синтезу. Побудовано трирівневу базову архітектуру БСУЕП із змінним складом обладнання, яка має постійне ядро та змінні модулі, за допомогою яких забезпечується адаптація системи до вимог конкретного підприємства. Побудовано структуру та алгоритм функціонування інтелектуальної БСУЕП для тепличного вирощування рослин.

7. Розроблено структуру, алгоритм функціонування, програмне та технічне забезпечення базової інтелектуальної складової для збору та опрацювання даних, яка ґрунтується на використанні штучних нейронних мереж з використанням, в процесі її програмно-апаратної реалізації, паралельного таблично-алгоритмічного обчислення скалярного добутку з використанням двох і більше таблиць (Заявка на видачу патенту № а201711461 від 23.11.2017 р.), що дає змогу опрацьовувати дані в режимі реального часу та розпаралелити процес опрацювання нечітких даних. Реалізовано пристрій збереження та обміну даними в БСУЕП з промисловою мережею, в якому завдяки використанню методу часового розподілу ресурсів пам'яті, забезпечено безконфліктний обмін даними у реальному часі та збільшено множину зовнішніх пристроїв, що реалізують режим звертання багатьох до багатьох.

8. Результати дисертаційної роботи використовуються при розробленні перспективних радіоелектронних систем, які працюють в режимі реального часу в Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України та впроваджені у навчальний процес кафедри автоматизованих систем управління Національного університету "Львівська політехніка".

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Как нам начать четвертую промышленную революцию. *Власть денег*. 2015. № 9/434. URL: <http://www.dsnews.ua/future/kak-nam-nachat-chetvertuyu-promyshlennuyu-revolyuetsiyu-05092015101200> (Last accessed: 3.09.2018).
2. Шпак Н. О. Венгер О. І. Переваги використання інформаційно-комунікаційних технологій в Україні. *Вісник Національного університету "Львів. Політехніка"*. 2012. № 727. С. 461–467
3. Дуглас Вильямс Программируемый робот, управляемый с КПК. ИТ Пресс, 2006. 224 с.
4. Matviichuk K., Teslyuk V., Teslyuk T. Vision system model for mobile robotic systems. *Proceeding of the XIII International Conference "Perspective Technologies and Methods in MEMS Design"*, MEMSTECH'2016, (20 - 24 April 2016 Polyana, Lviv, Ukraine). Lviv, 2016. P. 104 – 106.
5. Denysyuk P., Matviichuk K., Duda M., Teslyuk T., Kobyluk Y. Technical Support for Mobile Robot System RoboCAD. *Proc. of the XIII Inter. Conf. On Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, CADSM'2013*. Lviv-Polyana, Ukraine, 2013. P.431–432.
6. Denysyuk P., Teslyuk T., Teneta K., Medvid A., Sherstniakova O. An Algorithm of Determining the Direction of Motion of Mobile Robotic System. *Proc. of the IX-th Intern. Conf. on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design 2013 (MEMSTECH'2013)*. Lviv: Publisher Lviv Polytechnic Publishing House. 2013. P. 149–150.
7. Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. Системи штучного інтелекту: навч. посіб. / За ред. В.В. Пасічника; Львів: Магнолія, 2006, 2013. 279с.
8. Rad Ciprian-Radu, Hancu Olimpiu, Takacs Ioana-Alexandra, Olteanu Gheorghe. Smart Monitoring of Potato Crop: A Cyber-Physical System Architecture Model in the Field of Precision Agriculture. "ST26733", International Conference "Agriculture for Life, Life for Agriculture". 2015. 6. С. 73–79.

9. Teslyuk T.V., Tsmots I.G., Teslyuk V.M., Medykovskyy M.O. Optimization of the structure of wind power station with the use of the branch and bound method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 2, Issue 8 (86). P. 4–9.
10. Teslyuk V., Beregovskiy V., Denysyuk P., Teslyuk T., Lozynskiy A. Development and Implementation of the Technical Accident Prevention Subsystem for the Smart Home System. *I.J. Intelligent Systems and Applications*. Jan. 2018. Vol. 10, No.1. P. 1-8.
11. Emerging Global Trends in Advanced Manufacturing. March 2012. URL: [https://www.wilsoncenter.org/sites/default/files/Emerging\\_Global\\_Trends\\_in\\_Advanced\\_Manufacturing.pdf](https://www.wilsoncenter.org/sites/default/files/Emerging_Global_Trends_in_Advanced_Manufacturing.pdf) (Last accessed: 5.09.2018).
12. Цмоць І.Г., Батюк А.Є., Яворський А.В., Теслюк Т.В. Система моніторингу технологічних процесів “розумного підприємства”. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Інформаційні системи та мережі*. 2018. № 887. С. 10 – 17.
13. INDUSTRIE 4.0 - розумне виробництво майбутнього. Державна Ні Tech стратегія Німеччини до 2020 року. Березень 2018. URL: <https://controlmarket.com.ua/blog/industrie4-smart-manufacturing-for-the-future> (Last accessed: 3.09.2018).
14. Мартин Н., Савченко С. Индустрия 4.0": что будет с рынком труда?. 20.01.2016. URL: <https://p.dw.com/p/1Hh5k> (Last accessed: 4.09.2018).
15. Что такое Индустрия 4.0? Цифры и факты. URL: <http://holzex.ru/chto-takoe-industriya-4-0-tsifry-i-faktyi/> (Last accessed: 3.09.2018).
16. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond, 2016. URL: <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond> (Last accessed: 3.09.2018).
17. Hermann M.; Pentek T.; Otto B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. 2016. URL:



<https://ieeexplore.ieee.org/document/7427673/?arnumber=7427673&newsearch=true&queryText=industrie%204.0%20design%20principles> (Last accessed: 4.09.2018).

18. Скіцько В. І. Індустрія 4.0 як промислове виробництво майбутнього. *Інвестиції: практика та досвід*. 2016. № 5. С. 33-40. – URL: [http://www.investplan.com.ua/pdf/5\\_2016/8.pdf](http://www.investplan.com.ua/pdf/5_2016/8.pdf) (Last accessed: 3.09.2018).

19. Ганжа В.Л. Основы эффективного использования энергоресурсов. Мн.: Белорусская наука, 2007. 452 с.

20. Nilsson J. S., Mårtensson A. Municipal energy-planning and development of local energy-systems. *Applied Energy*. 2003. Т. 76. №. 1. С. 179-187.

21. Івахненко, С. В. Сучасні інформаційні технології управління підприємством та бухгалтерія: проблеми і виклики. *Бухгалтерський облік і аудит*. 2006 №4 С. 52-58. – URL: [http://www.ivakhnenkovaudit.info/zPubl/Ivakhnenkov\\_2006\\_BOArt\\_First.pdf](http://www.ivakhnenkovaudit.info/zPubl/Ivakhnenkov_2006_BOArt_First.pdf) (Last accessed: 5.09.2018).

22. Чухрай Н. І. Оцінювання функціонування ланцюга поставок: сутність та концептуальні підходи. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку*. 2009. № 647. С. 276–285.

23. WELCOME TO ISA-95.COM URL: <https://isa-95.com/> (Last accessed: 4.09.2018).

24. What is ISA-95? URL: [https://www.apsom.org/docs/T061\\_isa95-04.pdf](https://www.apsom.org/docs/T061_isa95-04.pdf) (Last accessed: 4.09.2018).

25. Dennis Brandl Practical Applications of the ISA 95 standard. URL: [https://web-material3.yokogawa.com/2/11821/tabs/document\\_11744.pdf](https://web-material3.yokogawa.com/2/11821/tabs/document_11744.pdf) (Last accessed: 4.09.2018).

26. International standard IEC62264-1. URL: [https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec62264-1%7Bed1.0%7Den.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec62264-1%7Bed1.0%7Den.pdf) (Last accessed: 5.09.2018).

27. IEC/FDIS. 62264-1. Enterprise-control system integration. URL: [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/397039/mod\\_folder/content/0/ISA95%20par](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/397039/mod_folder/content/0/ISA95%20par)

[t%201%20Models%20and%20terminology%20\(draft\).pdf?forcedownload=1](#) (Last accessed: 3.09.2018).

28. Маслянюк, П. П. Системне проектування процесів інформатизації. *Наукові вісті НТУУ "КПІ*. 2008. 1 С.28-36.

29. Гавриленко С.Ю., Шитьков П. А. Использование языка XML для промежуточного представления программы. *Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт. Серия: Информатика и моделирование*. 2008. С. 24.

30. Capehart B.L., Turner W.C., Kennedy W.J. Guide to Energy Management. Seventh Edition. Fairmont Press, 2011. 659 p.

31. Yang M., Yu X. Energy efficiency: benefits for environment and society. Springer, 2015. 168 p.

32. Thiede S.. Energy efficiency in manufacturing systems. Springer, 2012. 212 p.

33. Oung K.. Energy Management in Business: The Manager's Guide to Maximising and Sustaining Energy Reduction. Gower Publishing, 2013. 278 p.

34. Smith B.E.. Green Computing: Tools and Techniques for Saving Energy, Money, and Resources. CRC Press, 2014. 254 p.

35. Metaxiotis K. et al. Intelligent information systems and knowledge management for energy: applications for decision support, usage, and environmental protection. Information Science Reference, 2013. 523 p.

36. Thollander P., Palm J. Improving energy efficiency in industrial energy systems: an interdisciplinary perspective on barriers, energy audits, energy management, policies, and programs. Springer, 2013. 161 p.

37. Цмоць, І. Г.; Ваврук, І. Є. Особливості реалізації інтелектуальних компонентів робототехнічних систем. *Техніка*. 2010. 9. С. 4-7.

38. STMicroelectronics. URL: [https://www.st.com/content/st\\_com/en.html/](https://www.st.com/content/st_com/en.html/) (Last accessed: 5.09.2018).

39. Карвинен Т., Карвинен К., Валтокари В. Делаем сенсоры: проекты сенсорных устройств на базе Arduino и Raspberry Pi .: Пер.с англ. М.: ООО “И. Д. Вильямс”, 2015. 432 с.
40. RASPBERRY PI 3 MODEL B. URL: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/> (Last accessed: 3.09.2018).
41. MELSEC-F Series FX3U/FX3UC Main Units and Configuration. URL: [https://us.mitsubishielectric.com/fa/en/products/controllers/programmable-controllers-melsec/melsec\\_f-series/main-unit/main-unit-fx3u](https://us.mitsubishielectric.com/fa/en/products/controllers/programmable-controllers-melsec/melsec_f-series/main-unit/main-unit-fx3u) (Last accessed: 3.09.2018).
42. Левчук О.М. Комп’ютерні системи та мережі: програмна підтримка. 2016. URL: [https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/13653/1/%D0%9B%D0%B5%D0%B2%D1%87%D1%83%D0%BA\\_%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%87%D0%BA%D0%B0\\_%D0%9A%D0%A1%D0%9C%D0%9F%D0%9F\\_2016.pdf](https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/13653/1/%D0%9B%D0%B5%D0%B2%D1%87%D1%83%D0%BA_%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%87%D0%BA%D0%B0_%D0%9A%D0%A1%D0%9C%D0%9F%D0%9F_2016.pdf) (Last accessed: 4.09.2018).
43. Андреев Е.Б. Куцевич Н.А., Синенко О.В. SCADA–системы: взгляд изнутри. М.: Изд-во «РТСофт», 2004. 176 с.
44. Цмоць І.Г., Теслюк Т.В. Коваль В.Я., Веніков Д. П., Притуляк Я. Г. Розроблення інформаційних моделей та БД для системи автоматизації структурного синтезу з використанням морфологічного методу. *Моделювання та інформаційні технології: Збірник наукових праць*. Київ: Інститут моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України. 2018. Вип. 82. С. 185 – 192.
45. Теслюк Т.В., Цмоць І.Г., Ємець В.Ф., Зелінський А.Я., Коваль В.Я. Метод синтезу структур компонентів системи управління технологічними процесами. *Моделювання та інформаційні технології: Збірник наукових праць*. Київ : Інститут моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України. 2018. Вип. 83. С. 165 – 173.

46. Волошин М.М.; Волошин С.М. Система управління енергоспоживанням та моніторингу витрат енергоресурсів. *Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету*. 2013. 21: С. 411 – 417.
47. Хадлстон К. Проектирование интеллектуальных датчиков с помощью Microchip dsPIC. МК-Пресс, 2008. 320 с.
48. Improved IC Temp Sensors Challenge Traditional Sensor. URL: <https://www.electronicdesign.com/analog/improved-ic-temp-sensors-challenge-traditional-sensor-devices> (Last accessed: 3.09.2018).
49. Schneider Electric. URL: <https://www.schneider-electric.com/ww/en/> (Last accessed: 3.09.2018).
50. Мальцев, П.П., Долидзе Н.С., Критенко М.И. Цифровые интегральные микросхемы. Справочник. М.: Радио и связь, 1994. 96 с.
51. Intel-museum. URL: [https://www.intel.com/content/www/us/en/company-overview/intel-museum.html/online/hist\\_micro/hof](https://www.intel.com/content/www/us/en/company-overview/intel-museum.html/online/hist_micro/hof) (Last accessed: 5.09.2018).
52. Intel Resource & Design Center. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/design/resource-design-center.html> (Last accessed: 4.09.2018).
53. ARM Ltd. Architecting a Secure Foundation. URL: <https://www.arm.com/> (Last accessed: 5.09.2018).
54. Якименко Ю.І., Терещенко Т.О., Сокол Є.І., Жуйков В.Я., Петергеря Ю.С. Мікропроцесорна техніка: Підручник. За ред. Т.О. Терещенко. К.: Видавництво "Політехнік", 2003. 440 с.
55. Atmel Corporation. URL: <https://www.microchip.com/> (Last accessed: 3.09.2018).
56. Плахтеев А.П., Плахтеев П.А. Анализ 32-разрядных архитектур микроконтроллеров встраиваемых и мобильных систем. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2009. 6. С.187–192.

57. Акимішин О.І., Сокіл В.М. Архітектура новітніх програмованих систем на кристалі Cypress Semiconductor. *Вісник національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі"*. 2010. №688. С. 3 – 10
58. Texas Instruments Incorporated. URL: <http://www.ti.com/> (Last accessed: 4.09.2018).
59. Microchip Technology. URL: <https://www.microchip.com/> (Last accessed: 5.09.2018).
60. Евстифеев А. В. Микроконтроллеры AVR семейства Tiny. Руководство пользователя. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. 432 с.
61. Евстифеев А. В. Микроконтроллеры AVR семейства Mega. Руководство пользователя. М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. 592 с.
62. 8-bit Atmel XMEGA A Microcontroller XMEGA A MANUAL. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc8077.pdf> (Last accessed: 5.09.2018).
63. Huang Han-Way. The Atmel AVR Microcontroller: Mega and XMega in Assembly and C. Cengage Learning, 2013. 816 p.
64. Arm Cortex-M Series Processors. URL: <https://developer.arm.com/products/processors/cortex-m> (Last accessed: 5.09.2018).
65. Березький О. М., Теслюк В. М., Борейко О. Ю., Михайлюк А.Ю. Технічне та методичне забезпечення інженерного навчання для спеціальності "Комп'ютерні системи та мережі". *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. 25(2).
66. Compare board specs. URL: <https://www.arduino.cc/en/products.compare> (Last accessed: 2.09.2018).
67. Arduino Products. URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/Products> (Last accessed: 5.09.2018).
68. TSW-STM8069 - STM8S/A Standard peripheral librar. URL: <https://www.st.com/en/embedded-software/stsw-stm8069.html> (Last accessed: 3.09.2018).

69. Stm8l-series. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers/stm8l-series.html?querycriteria=productId=SS1336> (Last accessed: 4.09.2018).
70. Application note. STM32L4 and STM32L4+ ultra-low-power features overview. URL: [https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/9e/9b/ca/a3/92/5d/44/ff/DM00148033.pdf/files/DM00148033.pdf/jcr:content/translations/en.DM00148033.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/9e/9b/ca/a3/92/5d/44/ff/DM00148033.pdf/files/DM00148033.pdf/jcr:content/translations/en.DM00148033.pdf) (Last accessed: 4.09.2018).
71. STM32F1 series. URL: [https://www.st.com/content/st\\_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-mainstream-mcus/stm32f1-series.html?querycriteria=productId=SS1031](https://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-mainstream-mcus/stm32f1-series.html?querycriteria=productId=SS1031) (Last accessed: 5.09.2018).
72. STM32 coding matrix. URL: <https://github.com/pavelrevak/pystlink/wiki/STM32-coding-matrix> (Last accessed: 5.09.2018).
73. Prototyping environment. URL: <http://www.stm32circle.com/hom/index.php> (Last accessed: 4.09.2018).
74. Raspberry Pi A small and affordable computer that you can use to learn programming. URL: <https://www.raspberrypi.org/> (Last accessed: 4.09.2018).
75. Петров И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приёмы прикладного проектирования. Под ред. проф. В. П. Дьяконова. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 256 с.
76. Structured Text (ST). PLC Programming with IEC-61131-3. URL: <https://www.plcacademy.com/structured-text-tutorial.pdf> (Last accessed: 5.09.2018).
77. Петров И. В., «Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приёмы прикладного проектирования» / Под ред. проф. В.П. Дьяконова.- М.:СОЛОН-Пресс, 2004. 256 с.
78. Jochen Petry: «IEC 61131-3 mit CoDeSys V3: Ein Praxisbuch für SPS-Programmierer», 2011. 839 с.
79. Айвор Хортон Microsoft Visual C++ 2005: базовый курс = Beginning Visual C++ 2005. М.: «Диалектика», 2007. 1152 с.

80. DeviceHive Discovery Platform RPi. URL: <http://devicehive.com/documentation> (Last accessed: 3.09.2018).
81. Sydor, A. R., Teslyuk, V. M., Denysyuk, P. Y.: Recurrent expressions for reliability indicators of compound electropower systems. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2014. №4, С. 47 – 49.
82. Теория систем и вычислительные методы / Сб. науч. тр. АН УССР. Киев: ИК, 1987. 80 с.
83. Скорохода, Олекса Володимирович. Синтез нейроелементів і нейромереж реального часу паралельно-вертикального типу: автореф. дис. ... канд. техн. Наук. Львів, 2013. 20 с.
84. Patti R.S.: Three-Dimensional Integrated Circuits and the Future of System-on-Chip Designs. *Proceedings of the IEEE*. 2006. Vol. 94. Issue 6. P. 1214 – 1224.
85. Лотов А.В., Бушенков В.А., Каменев Г.К., Черных О.Л.. Компьютер и поиск компромисса. Метод достижимых целей. М.: Наука, 1997. 239 с.
86. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация: теория, вычисления и приложения. - М.: Радио и связь, 1992. 504 с.
87. Брахман Т. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике.- М.: Радио и связь, 1984. 288 с.
88. Tsmots I., Teslyuk T., Opotyak Y. Selection of Hardware Features and Synthesis of Multilevel Control System Components of Energy Efficiency of Production Processe. *Proceedings of the 5th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design*. (18 - 22 April 2018 Polyana, Lviv, Ukraine). Lviv, 2018. P.186-190.
89. Медиковський М.О., Шуневич О.Б. Дослідження ефективності методів визначення вагових коефіцієнтів важливості. *Вісник Хмельницького національного університету: зб. наук.-техн. праць*. Хмельницький: Вид-во Хмельницького НУ. 2011. №5. С.176-182.
90. Подиновский В.В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. М.:ФИЗМАТЛИТ, 2007. 64 с.

91. Зовнішні інтерфейси комп'ютера для підключення пристроїв URL: <https://inuasparwil.ru/rizne/9297-zovnishni-interfejsi-komp-jutera-dlja.html> (Last accessed: 4.09.2018).
92. Норенков И.П. САПР: Системы автоматизированного проектирования. Принципы построения и структура. Москва: Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана, 1987. 123 с.
93. Уилсон Р. Введение в теорию графов. Москва: Мир, 1977. 208с.
94. Татт У. Теория графов. Москва: Мир, 1988. 424 с.
95. Groover M. P. Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing. Prentice Hall Press, 2007. 221 p.
96. Rehg J.A., Henry W. K., Computer-Integrated Manufacturing. Prentice Hall, 2012. 496 p.
97. Leitão P. Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22.7, 2009. P. 979-991.
98. Пьявченко Т.А. Проектирование АСУТП в SCADA-системе: Учебное пособие. Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007. 84 с.
99. Цмоць І.Г., Теслюк Т.В., Машевська М.В., Теслюк В.М. Модель організації обміну та збереження даних у багаторівневих системах управління технологічними процесами. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України : збірник науково-технічних праць*. 2017. Т.27, № 1. С. 197–202.
100. Цмоць І.Г., Цимбал Ю.В., Скорохода О.В., Хавалко В.М., Теслюк Т.В. Апаратна реалізація нейромережових засобів шифрування-дешифрування інформаційних потоків даних. *Моделювання та інформаційні технології: Збірник наукових праць*. Київ: Інститут моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України. 2018. Вип. 82. С. 117 – 123.
101. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. СПб.: “Профессия”, 2009. 592с.



102. Медиковський М.О., Ткаченко Р.О., Цмоць І. Г., Цимбал Ю. В., Дорошенко А.В., Скорохода О.В. Інтелектуальні компоненти інтегрованих автоматизованих систем управління: монографія. Львів: “Видавництво Львівської політехніки”, 2015. 280 с.

103. Харазов В. Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. СПб.: “Профессия”, 2009. 592с.

104. Пупена О.М. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах: Навчальний посібник / О. М. Пупена, І. В. Ельперін, Н. М. Луцька, А. П. Ладанюк. К. : Вид-во «Ліра-к», 2011. 552с.

105. Tsmots I., Skorokhoda O., Teslyuk T., Rabyk V. Design Features of Hardware and Software Tools for Intelligent Processing of Intensive Data Streams. *Proceeding of the 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing, DSMP. (23 - 27 August 2016 Lviv, Ukraine)*. 2016. P. 332–335.

106. Ткаченко Р., Дорошенко А. Нейроподібні структури машини геометричних перетворень у завданнях інтелектуального аналізу даних. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. Львів, 2009. № 638 С. 179-184.

107. Рашкевич Ю.М., Ткаченко Р.О., Цмоць І.Г., Пелешко Д.Д. Нейроподібні методи, алгоритми та структури обробки сигналів і зображень у реальному часі: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. 256 с.

108. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. Москва: Мир, 1992. 240 с.

109. Новотарський М. А., Нестеренко Б. Б. Штучні нейронні мережі: Обчислення. Монографія. Київ, 2004. 407 с.

110. Tsmots I., Medykovskyy M., Skorokhoda A., Teslyuk T. Design of Intelligent Component of Hierarchical Control System. *ECONTECHMOD. An International Quarterly Journal*. 2016. Vol. 05, No. 2. P. 3-10.

111. Цмоць І.Г., Теслюк Т.В. Структура та моделі роботи системи управління мікрокліматом мінітеплиці. *Вісник Національного університету*

“Львівська політехніка”. *Комп'ютерні Науки та Інформаційні Технології*. 2016. С. 228-237.

112. Tsmots I., Teslyuk V., Teslyuk T., Ihnatyev I. Basic Components of Neuronetworks with Parallel Vertical Group Data Real-Time Processing. / In: Shakhovska N., Stepashko V. (eds) *Advances in Intelligent Systems and Computing II. CSIT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 689. Springer, Cham. P. 2018. 558 – 576.

113. Tsmots I., Skorokhoda O., Tsymbal Y., Teslyuk T., Khavalko V. Neural-Like Means for Data Streams Encryption and Decryption in Real Time. *Proceeding of the 2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing, DSMP*. (21 - 25 August 2018 Lviv, Ukraine). Lviv, 2018. P. 438 – 443.

114. Teslyuk T.V., Tsmots I.H., Teslyuk V.M., Medykovskyy M.O., Holovatyy A.I. Intelligent components of multilevel system for energy efficiency management in regional economy. *Proc. of the XIV Intern. Conf. on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2017)*. Lviv – Polyana., Ukraine, 2017. P. 319–323.

115. Цмоць І.Г., Теслюк В.М., Теслюк Т.В., Медиковський М.О. Пристрій для обчислення сум парних добутків. Заявка на видачу патента України на винахід. Заявник Національний університет “Львівська політехніка”. Заявка № а 2017 11461 від 23.11.2017 р.

116. Teslyuk T., Tsmots I., Teslyuk V., Medykovskyy M., Opotyak Y. Architecture of the management system of energy efficiency of technological processes at the enterprise. *Proc. of the XII-th Intern. Conf. of Computer Science & Information Technologies 2017 (CSIT'2017)*. Lviv, 2017. P. 429–433.

117. Теслюк Т., Цмоць І., Опотьяк Ю., Теслюк В. Архітектура багаторівневої системи управління енергоефективністю регіону. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2017. № 864. С. 201–209.

118. Arm. Products that Transform Your Business. URL: <https://www.arm.com/> (Last accessed: 3.09.2018).

119. Bernard Cohen. Howard Aiken, Portrait of a computer pioneer. Cambridge, Massachusetts : The MIT Press, 2000. C. 53.

120. WI-FI WIFI UART RS232 SHIELD ДЛЯ ARDUINO. URL: <https://diylab.com.ua/p60827123-wifi-uart-rs232.html> (Last accessed: 5.09.2018).

121. EUHT Smart Industrial Products URL: <http://www.nufrontsoft.com/index.php/project/index/id/30.html> (Last accessed: 4.09.2018).

122. An Alternative to ESP8266? Realtek RTL8710 ARM Cortex-M3 WiFi IoT Modules Sell URL: <https://www.cnx-software.com/2016/07/28/an-alternative-to-esp8266-realtek-rtl8710-arm-cortex-m3-wifi-iot-modules-sell-for-2-and-up/> (Last accessed: 4.09.2018).

123. ESP8266EX Datasheet. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf) (Last accessed: 4.09.2018).

124. Raspberry Pi. A small and affordable computer that you can use to learn programming. URL: <https://www.raspberrypi.org/> (Last accessed: 5.09.2018).

125. What is BeagleBone Black? URL: <https://beagleboard.org/black> (Last accessed: 4.09.2018).

126. Internet of Things. Hardware. Share. URL: <https://software.intel.com/en-us/iot/hardware/discontinued> (Last accessed: 5.09.2018).

127. pcDuino is a mini PC. URL: <http://www.linksprite.com/linksprite-pcduino/> (Last accessed: 5.09.2018).

128. Cubieboard2 is here. URL: <http://cubieboard.org/2013/06/19/cubieboard2-is-here/> (Last accessed: 4.09.2018).

129. What's Orange Pi Pc Plus? URL: <http://www.orangepi.org/> (Last accessed: 3.09.2018).

130. Linux for ARM development boards. URL: <https://www.armbian.com/> (Last accessed: 4.09.2018).

131. The MAX® II CPLD family. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/programmable/cpld/max-ii.html>

(Last accessed: 5.09.2018).

132. FPGA Leadership across Multiple Process Nodes. URL: <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga.html> (Last accessed:

5.09.2018).

133. The RS232 STANDARD. URL: [https://www.camiresearch.com/Data\\_Com\\_Basics/RS232\\_standard.html](https://www.camiresearch.com/Data_Com_Basics/RS232_standard.html) (Last

accessed: 5.09.2018).

134. Л.Є. Базилевич. Дискретна математика у прикладах і задачах : теорія множин, математична логіка, комбінаторика, теорія графів. Математичний практикум. Львів, 2013. 486 с.

135. Teslyuk T., Tsmots I., Teslyuk V., Medykovskyu M., Opotyak Y. Architecture and Models for System-Level Computer-Aided Design of the Management System of Energy Efficiency of Technological Processes at the Enterprise. / In: Shakhovska N., Stepashko V. (eds) *Advances in Intelligent Systems and Computing II. CSIT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. vol. 689. Springer, Cham. p. 538 – 557.

136. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. Москва : Мир, 1984. 435 с.

137. M. Diaz M. Petri Nets: Fundamental Models, Verification and Applications. John Wiley & Sons, 2010. 768 p.

138. Котов В. Е. Сети Петри. Москва: Наука, 1984. 160с.

139. Teslyuk T., Denysyuk P., Savitska O., Kobyluk Y., Voronyak R. Modeling of Mobile Robot Systems Using Petri Nets. *Proc. of the IX-th Intern. Conf. on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design 2013 (MEMSTECH'2013)*. Lviv: Publisher Lviv Polytechnic Publishing House. 2013. P. 169–171.

140. Теслюк В. М., Хамза Алі Юсеф Альшавабкех Інформаційна модель графа досяжності. *Модельовання та інформаційні технології*. Збірник

наукових праць ІППМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України. Київ, 2010. Вип. 58. С. 166-171.

141. Jensen, K., Kristensen, L. M.: Coloured Petri Nets: modelling and validation of concurrent systems. 1st edition, Springer, 2009 395 p.

142. V. M. Teslyuk, V. V. Beregovskiy, A. I. Pukach, “Development of smart house system model based on colored Petri nets”, in Proc. of International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, DIPED’2013. (September 2013, Lviv, Ukraine). Lviv, 2013, P. 205 – 208.

143. Медиковський, М. О., Цмоць, І. Г., Цимбал, Ю. В. Інформаційно-аналітична система для управління енергоефективністю підприємств у м. Львів. *Актуальні проблеми економіки*. 2016. 1. С. 379-384.

144. Денисюк П.Ю. Теслюк В.М., Перейма М.Є., Теслюк Т.В. Використання ієрархічних мереж Петрі для моделювання МЕМС. *Науковий Вісник НЛТУ України*. 2011. Вип. 21. 17. С. 340–343.

145. Теслюк Т. Аналіз динаміки функціонування багаторівневих систем з використанням моделей на основі ієрархічних мереж Петрі. *Науковий Вісник НЛТУ України*. 2018. Том. 28. № 8. С. 149–154.

146. Теслюк Т. В., Цмоць І. Г., Медиковський М. О., Машевська М. В., Теслюк В. М. Система автоматизованого синтезу пристроїв на базі мікроконтролерів. Матеріали VIII-ої Українсько-польської науково-практичної конференції “Електроніка та інформаційні технології” (ЕЛІТ-2017). (27-30 серпня 2017). Львів-Чинадієво, Україна. 2017. С. 142–145.

147. Буч Г. Объектно-ориентированное проектирование с примерами применения. Москва: Конкорд, 1996. 519 с.

148. Фред Лонг та ін. Руководство для программиста на Java: 75 рекомендаций по написанию надежных и защищенных программ. М.: «Вильямс», 2014. 256 с..

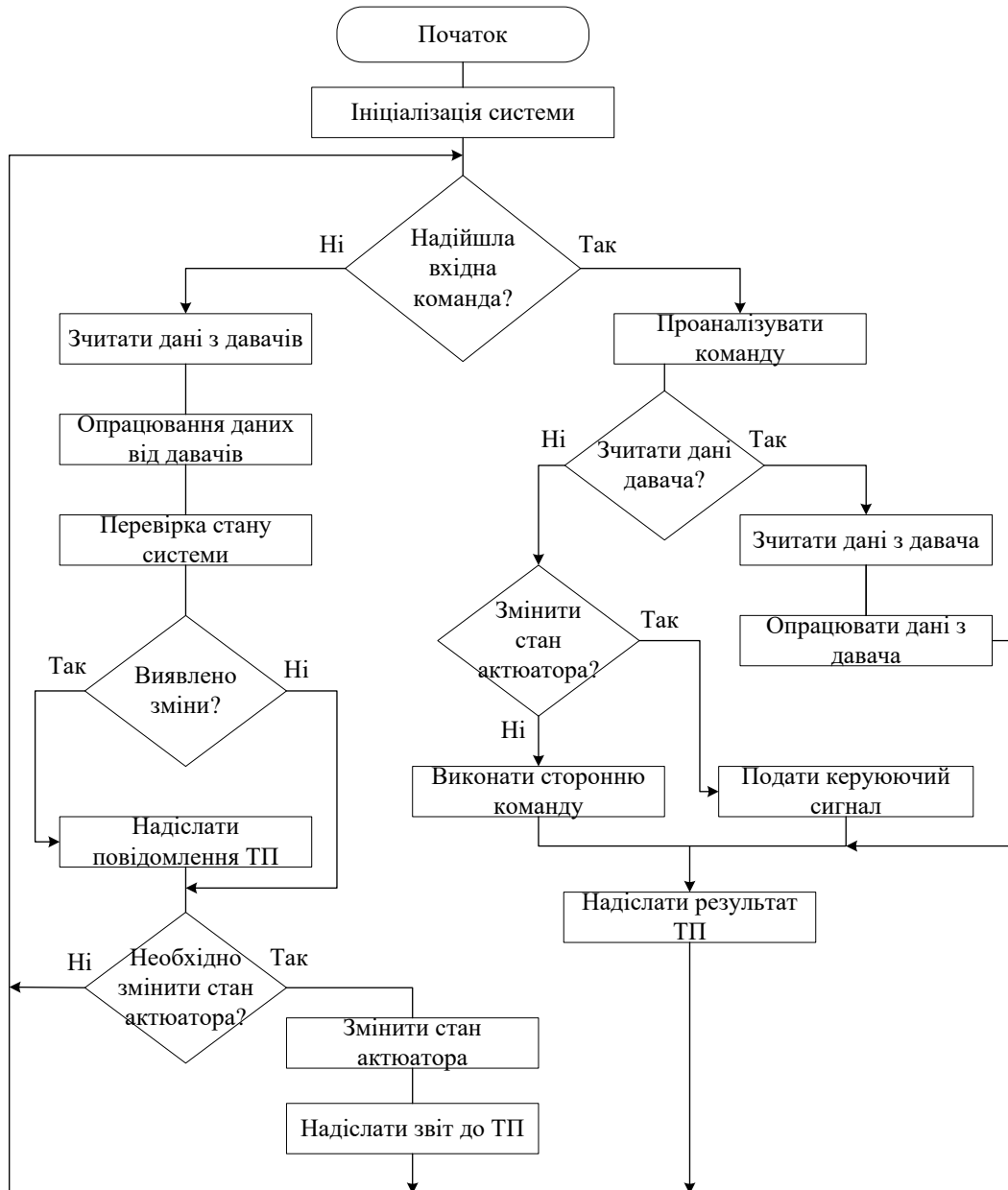
149. Грабер М. Введение в SQL. М.: Лори, 2010. 227с.

150. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных, 8-е издание. М.: «Вильямс», 2005. 1328 с.
151. Пасічник В. В., Резніченко В.А. Організація баз даних та знань. Київ: Видавнича група ВНУ, 2006. 384 с.
152. Романюк О.Н., Савчук Т.О. Організація баз даних та знань. Вінниця: ВДТУ, 2001. 123 с.
153. Теслюк Т. В., Зелінський А.Я., Угрин Л.Є., Коваль В. Я. Система розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації з використанням побудови множини оптимальних рішень – Парето. *Моделювання та інформаційні технології*: Збірник наукових праць. Київ: Інститут моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України. 2018. Вип. 82. С. 148 – 153.
154. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. 256 с.
155. Denysyuk P. Usage of XML for fluidic MEMS database design. *Proceeding of the 3rd International Conference of Young Scientists "Perspective Technologies and Methods in MEMS Design"*, MEMSTECH-2007. 2007. P. 148.
156. Теслюк В.М. Математичне моделювання в САПР: Ч.1. Конспект лекцій з курсу “Математичне моделювання в САПР” для студентів базового напрямку “Комп’ютерні науки”. Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2009. 64 с.
157. Лотов А. В., Поспелова И. И. Многокритериальные задачи принятия решений: Уч. пособие. М.: Издат. отдел ф-та ВМиК МГУ, МАКС Пресс, 2008. 197 с.
158. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М. : Дрофа, 2006. 175 с.
159. Teslyuk T., Denysyuk P., Kernyskyu A., Teslyuk V. Automated Control System for Arduino and Android Based Intelligent Greenhouse. *Proc. of the XIth Inter. Conf. on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, MEMSTECH'2015*. Lviv-Polyana, Ukraine. 2015. P. 7–10.

160. Denysyuk P., Teslyuk T., Beregovskiy V., Cheremisin I., Duda M. Neural Controller of Intelligent Building Climate Control Subsystem on the Basis of a Multilayer Perceptron. *Proc. of the VII-th Intern. Conf. of Computer Science & Information Technologies 2012 (CSIT'2012)*. Lviv: Publisher Lviv Polytechnic. 2012. P. 26–27.

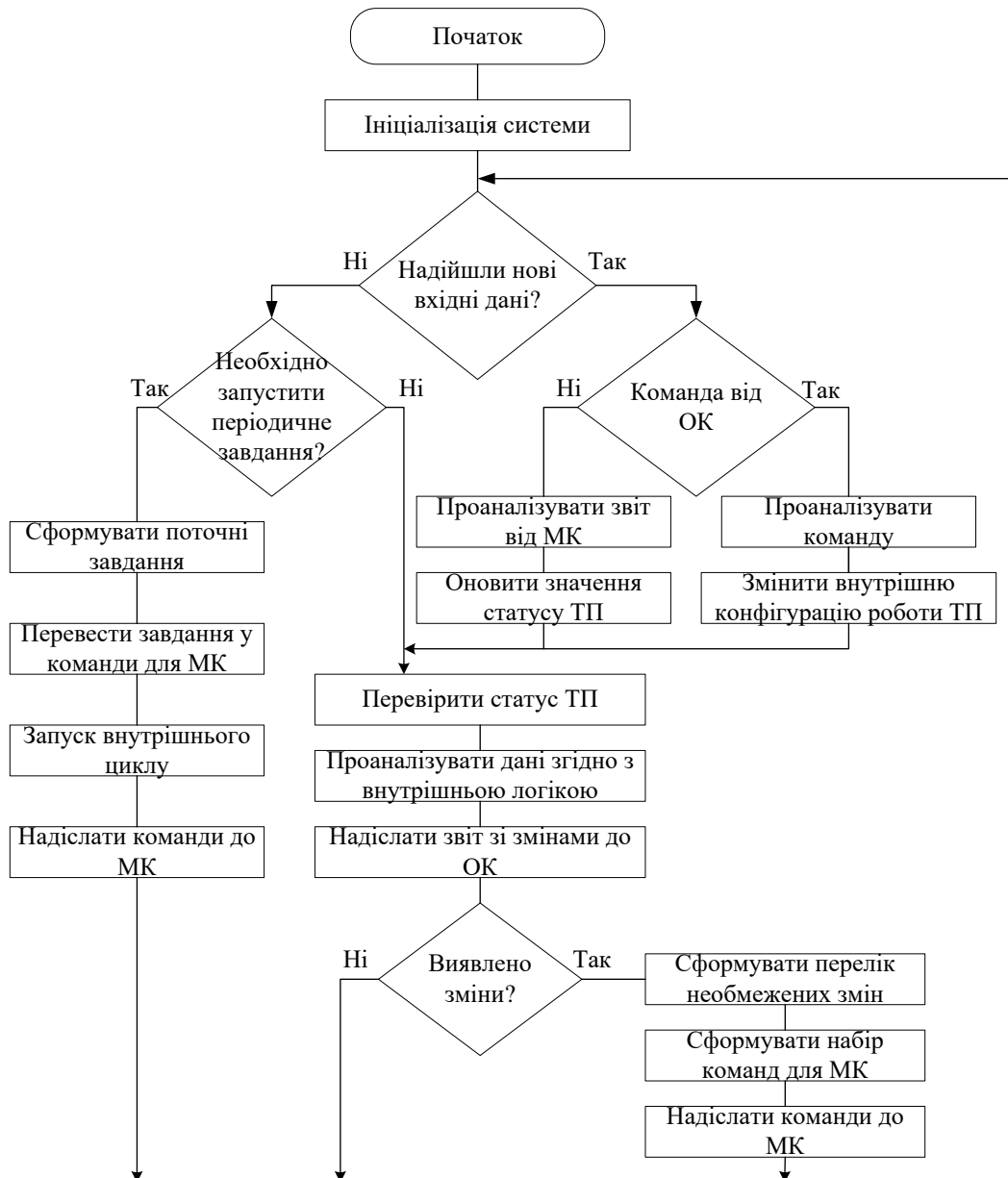
## ДОДАТКИ

## Додаток А. Блок-схема алгоритму роботи першого рівня БСУЕП

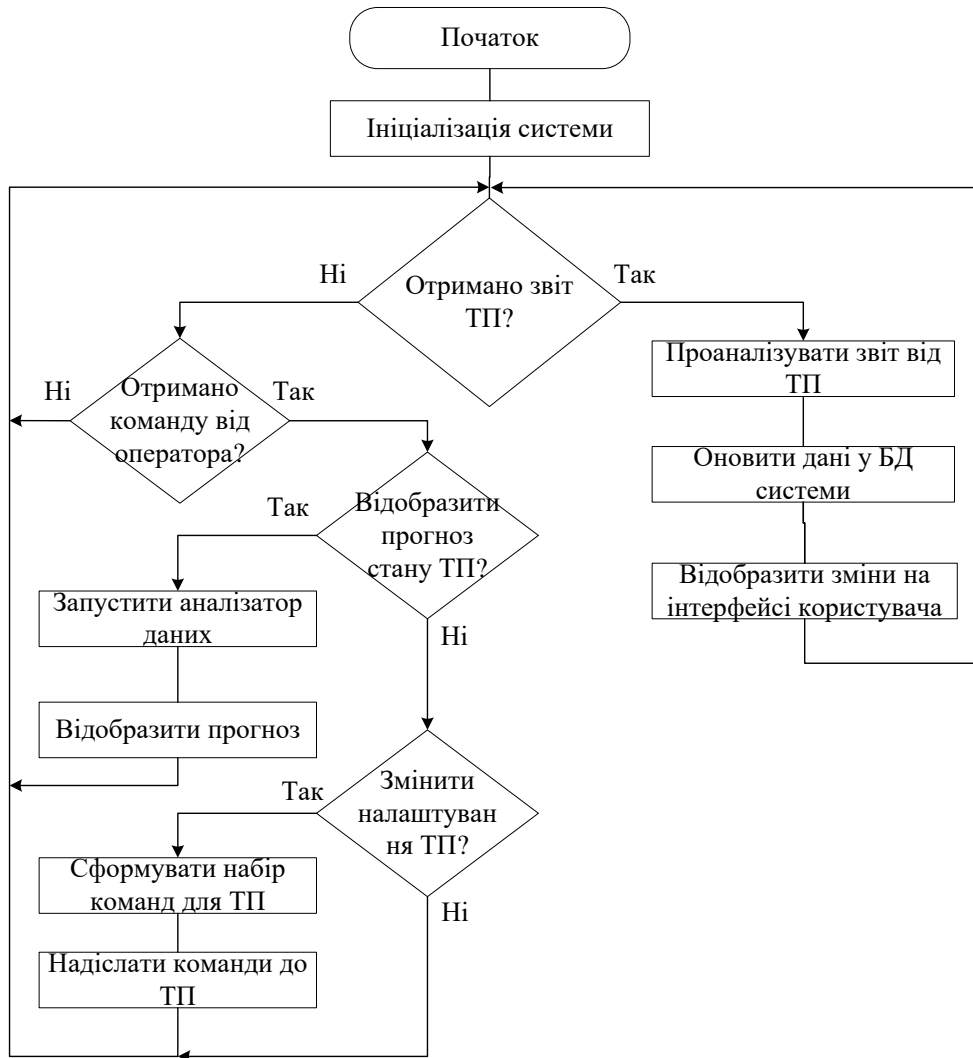




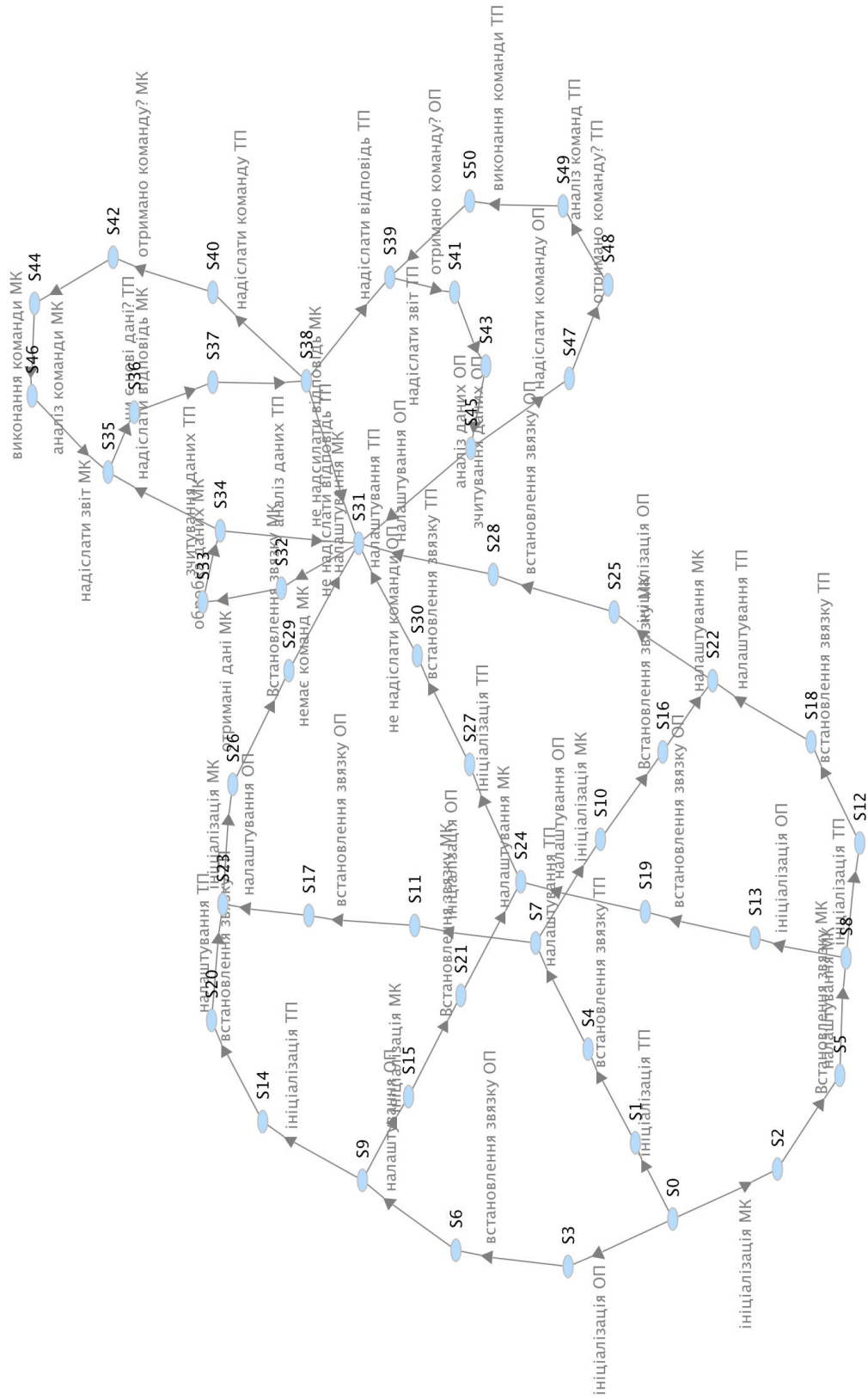
Додаток А1. Блок-схема алгоритму роботи другого рівня БСУЕП



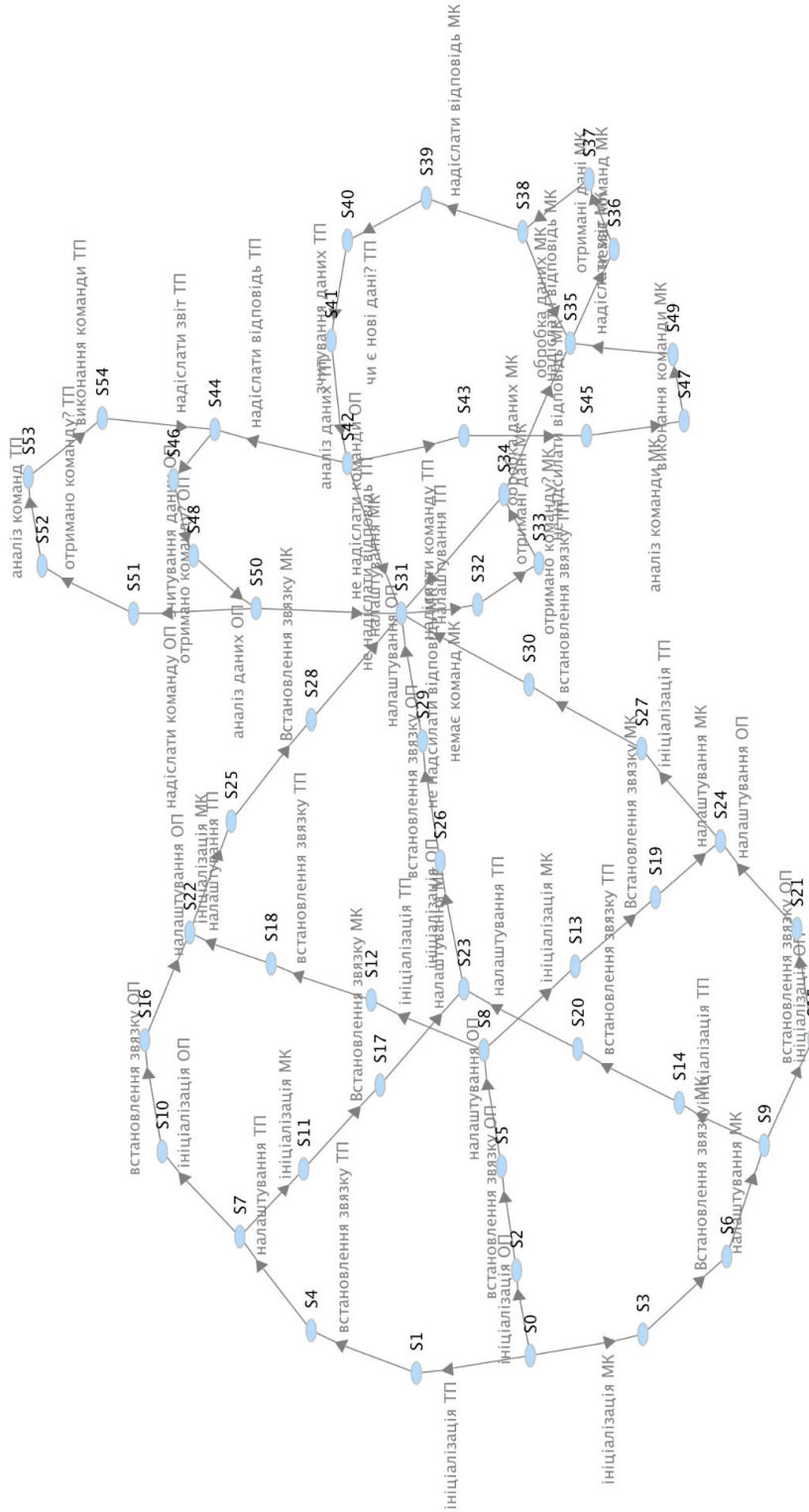
Додаток А2. Блок-схема алгоритму роботи третього рівня БСУЕП



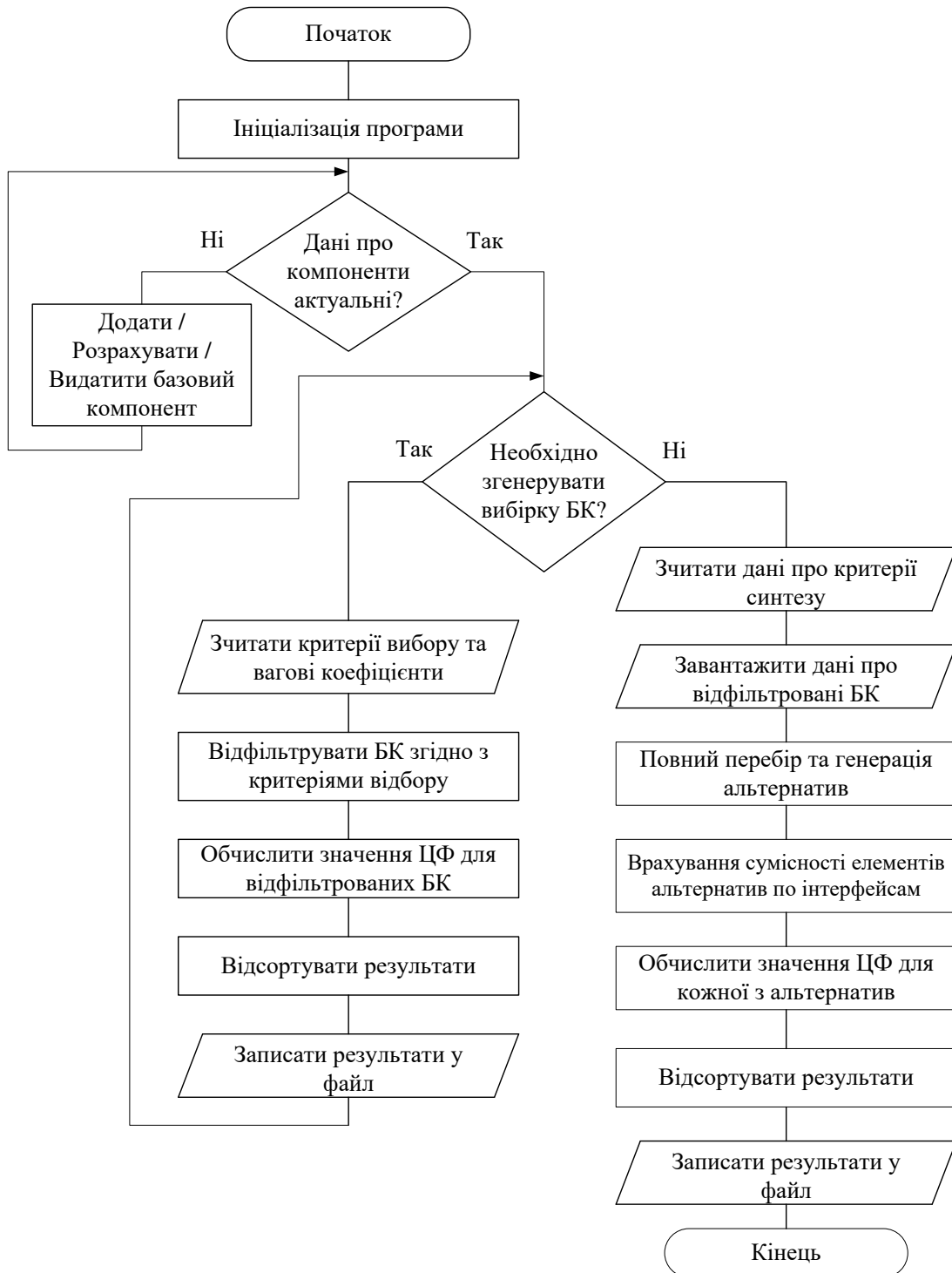
Додаток Б. Граф досяжності станів БСУЕП



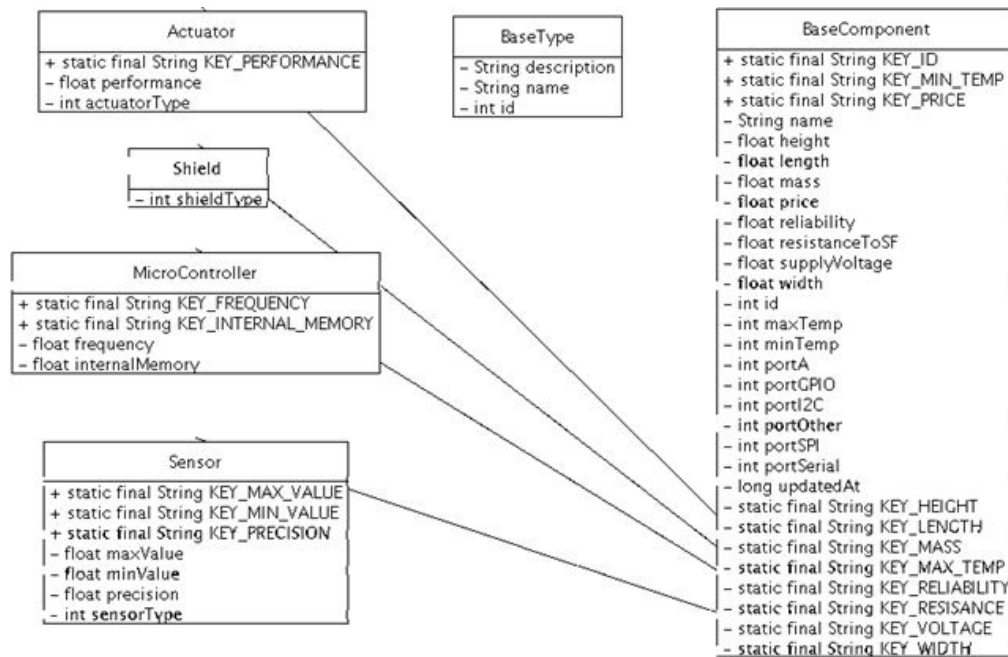
Додаток Б1. Результати дослідження у формі графа досяжності станів  
проектованої системи



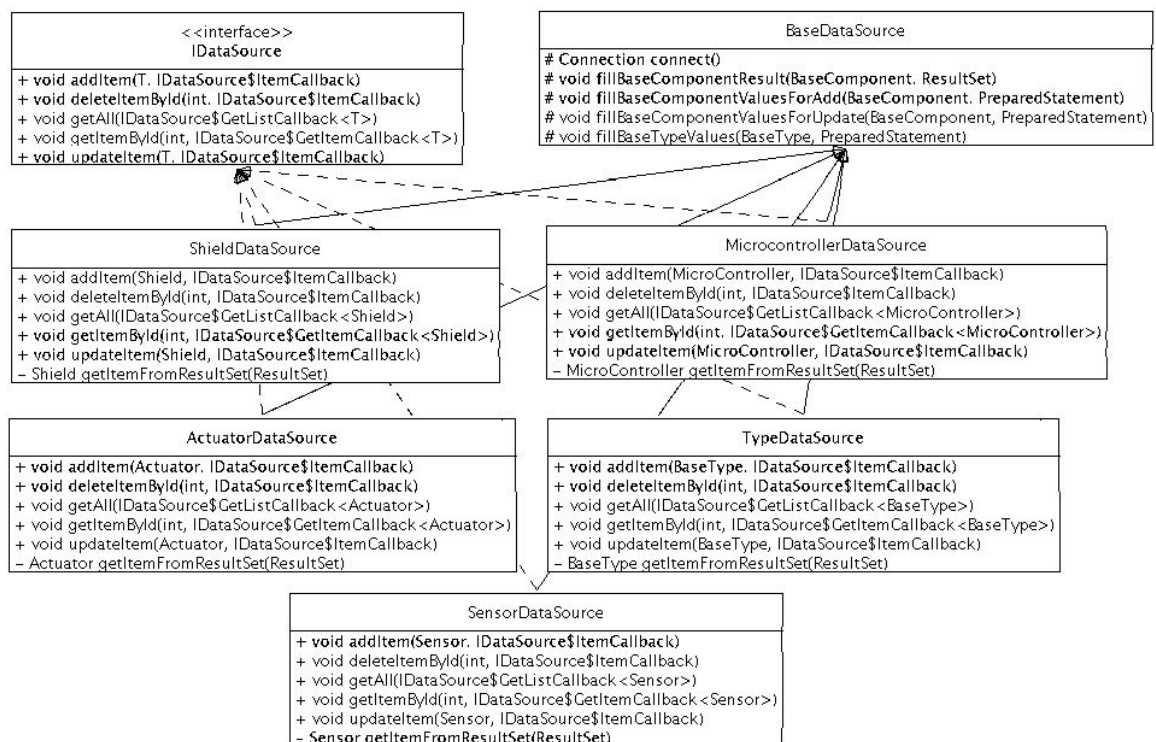
## Додаток В. Блок-схема алгоритму роботи системи синтезу



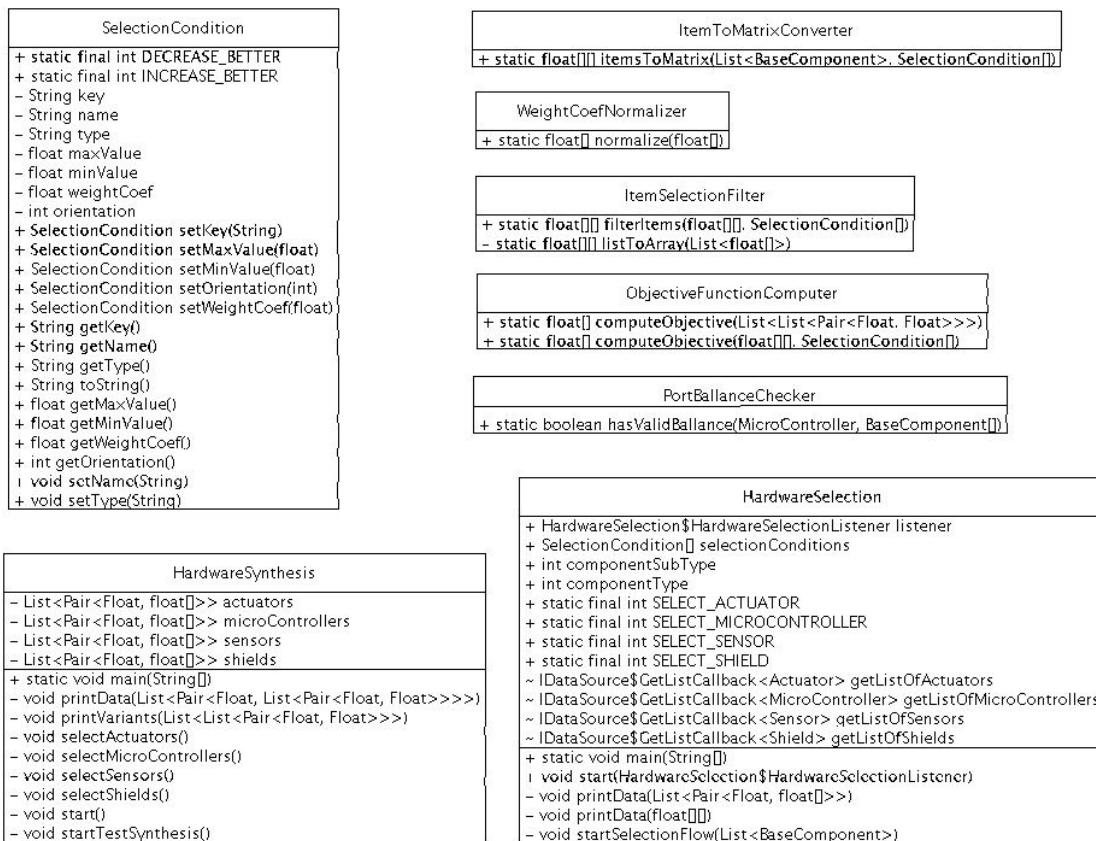
## Додаток В1. Діаграма класів моделей даних програмного забезпечення



## Додаток В2. Діаграма класів джерел даних програмного забезпечення



## Додаток В3. Діаграма класів обчислювального ядра



## Додаток Д. Структура таблиці “Мікроконтролери”

- Id;	CREATE TABLE `Microcontroller` (
- Id користувача;	`id` INTEGER PRIMARY KEY
- дата і час додання;	AUTOINCREMENT,
- ціна;	`name` TEXT NOT NULL
- потужність;	UNIQUE,
- мінімальна температура;	`updatedAt` LONG,
- максимальна температура;	`price` REAL,
- стійкість до спецфакторів;	`power` REAL,
- надійність;	`minTemp` INTEGER,
- ширина;	`maxTemp` INTEGER,
- висота;	`resistanceToSF` REAL,
- довжина;	`reliability` REAL,
- маса;	`width` REAL,
- напруга живлення;	`height` REAL,
- частота процесора;	`length` REAL,
- об'єм пам'яті;	`mass` REAL,
- кількість GPIO портів;	`supplyVoltage` REAL,
- кількість аналогових портів;	`frequency` REAL,
- кількість I2C портів;	`internalMemory` REAL,
- кількість SPI портів;	`portGPIO` INTEGER,
- кількість Serial портів;	`portA` INTEGER,
- кількість портів інших типів.	`portI2C` INTEGER,
	`portSPI` INTEGER,
	`portSerial` INTEGER,
	`portOther` INTEGER
	);



## Додаток Д1. Структура таблиці “Давачі”

- Id;	CREATE TABLE `Sensor` (
- Id користувача;	`Id` INTEGER PRIMARY KEY
- дата і час додання;	AUTOINCREMENT,
- Id типу давача;	`updatedAt` LONG,
- ціна;	`name` TEXT UNIQUE,
- потужність;	`sensorType` INTEGER,
- мінімальна температура;	`price` REAL,
- максимальна температура;	`power` REAL,
- стійкість до спецфакторів;	`minTemp` INTEGER,
- надійність;	`maxTemp` INTEGER,
- ширина;	`resistanceToSF` REAL,
- висота;	`reliability` REAL,
- довжина;	`width` REAL,
- маса;	`height` REAL,
- напруга живлення;	`length` REAL,
- нижня границя вимірювання;	`mass` REAL,
- верхня границя вимірювання;	`supplyVoltage` REAL,
- точність;	`minValue` REAL,
- кількість GPIO портів;	`maxValue` REAL,
- кількість аналогових портів;	`precision` REAL,
- кількість I2C портів;	`portGPIO` INTEGER,
- кількість SPI портів;	`portA` INTEGER,
- кількість Serial портів;	`portI2C` INTEGER,
- кількість портів інших типів.	`portSPI` INTEGER,
	`portSerial` INTEGER,
	`portOther` INTEGER,
	FOREIGN KEY(`sensorType`)
	REFERENCES `Type`(`ID`));

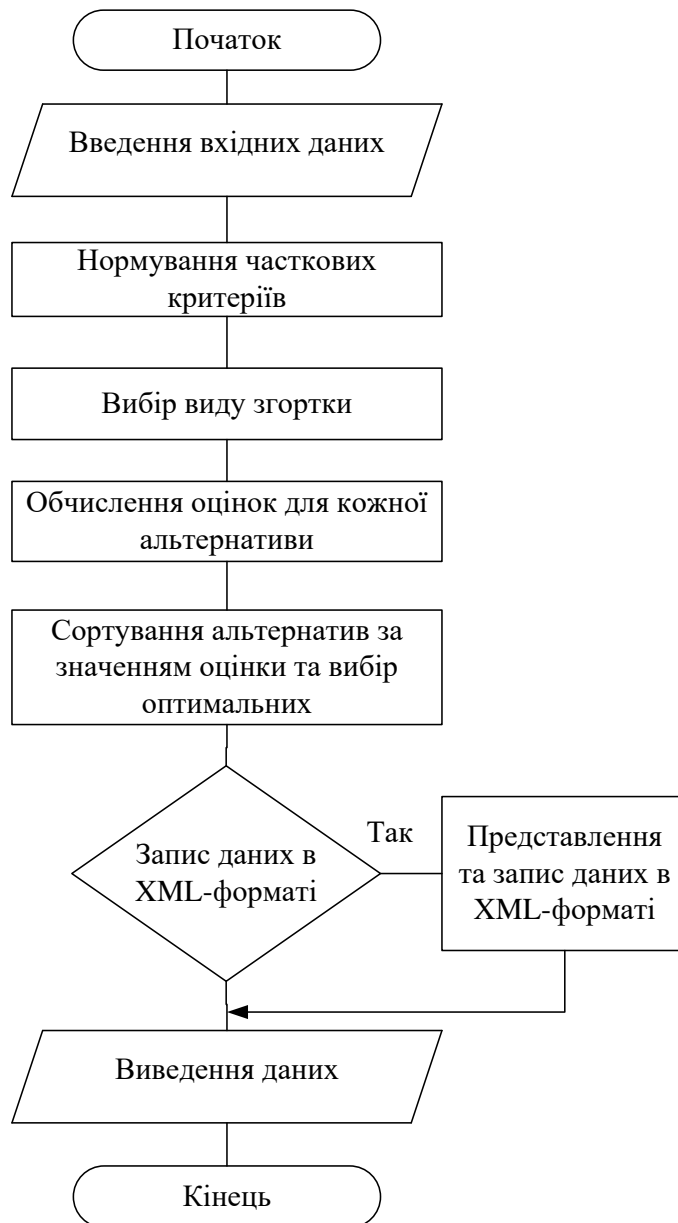
## Додаток Д2. Структура таблиці “Актюатори”

- Id;	CREATE TABLE `Actuator` (
- Id користувача;	`id` INTEGER PRIMARY KEY
- дата і час додання;	AUTOINCREMENT,
- Id типу актюатора;	`updatedAt` LONG,
- ціна;	`name` TEXT UNIQUE,
- потужність;	`actuatorType` INTEGER,
- мінімальна температура;	`price` REAL,
- максимальна температура;	`power` REAL,
- стійкість до спецфакторів;	`minTemp` INTEGER,
- надійність;	`maxTemp` INTEGER,
- ширина;	`resistanceToSF` REAL,
- висота;	`reliability` REAL,
- довжина;	`width` REAL,
- маса;	`height` REAL,
- напруга живлення;	`length` REAL,
- швидкодія;кіл	`mass` REAL,
- ькість GPIO портів;	`supplyVoltage` REAL,
- кількість аналогових портів;	`performance` REAL,
- кількість I2C портів;	`portGPIO` INTEGER,
- кількість SPI портів;	`portA` INTEGER,
- кількість Serial портів;	`portI2C` INTEGER,
- кількість портів інших типів.	`portSPI` INTEGER,
	`portSerial` INTEGER,
	`portOther` INTEGER,
	FOREIGN KEY(`actuatorType`)
	REFERENCES `Type`(`ID`)
	);

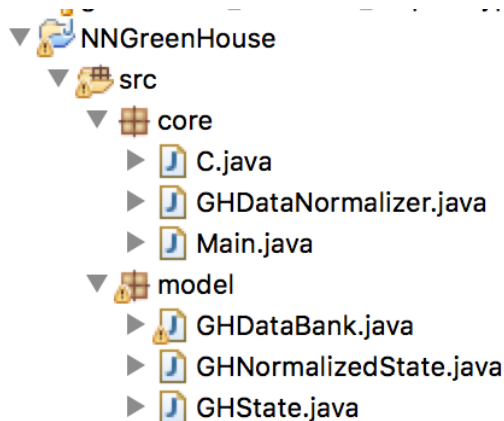
## Додаток ДЗ. Структура таблиці “Плати розширення”

- Id;	CREATE TABLE `Shield` (
- Idкористувача;	`id` INTEGER PRIMARY KEY
- дата і час додання;	AUTOINCREMENT,
- Id типу плати розширення;	`updatedAt` LONG,
- ціна;	`name` TEXT UNIQUE,
- потужність;	`shieldType` INTEGER,
- мінімальна температура;	`price` REAL,
- максимальна температура;	`power` REAL,
- стійкість до спецфакторів;	`minTemp` INTEGER,
- надійність;	`maxTemp` INTEGER,
- ширина;	`resistanceToSF` REAL,
- висота;	`reliability` REAL,
- довжина;	`width` REAL,
- маса;	`height` REAL,
- напруга живлення;	`length` REAL,
- кількість GPIO портів;	`mass` REAL,
- кількість аналогових портів;	`supplyVoltage` REAL,
- кількість I2C портів;	`portGPIO` INTEGER,
- кількість SPI портів;	`portA` INTEGER,
- кількість Serial портів;	`portI2C` INTEGER,
- кількість портів інших типів.	`portSPI` INTEGER,
	`portSerial` INTEGER,
	`portOther` INTEGER,
	FOREIGN KEY(`shieldType`)
	REFERENCES `Type`(`ID`)
	);

Додаток Е. Блок-схема алгоритму роботи підсистеми розв'язання ЗБО з використанням адаптивної, мультиплікативної та максимінної і мінімаксної згорток



## Додаток Є. Структура програми нейромережі



## Додаток Є1. Приклад коду основного класу для нормалізація даних

```

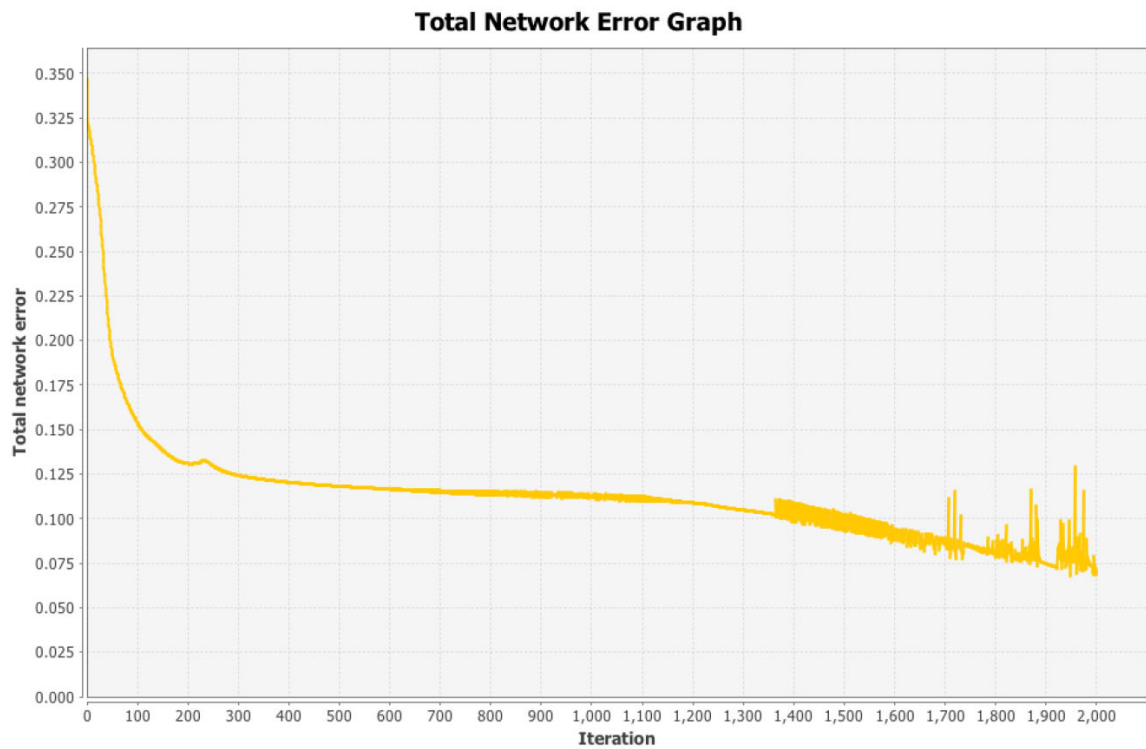
public class Main {
    public static void main(String[] args) {
        // TODO Auto-generated method stub
        GHDataBank bank = new GHDataBank();
        List<GHNormalizedState> normalizedData =
GHDataNormalizer.normalize(bank.getStates());
        printNormalizedDataSet(normalizedData);
    }
    private static void printNormalizedDataSet(List<GHNormalizedState> normalizedData) {
        StringBuilder builder = new StringBuilder();
        for(GHNormalizedState state : normalizedData) {
            builder.append("\n");
            int length = state.getData().length;
            for(int i = 0; i < length; i++) {
                builder.append(state.getData()[i]);
                if(i < length -1) {
                    builder.append("\t");
                }
            }
        }
        System.out.println(builder.toString());
    }
}

```

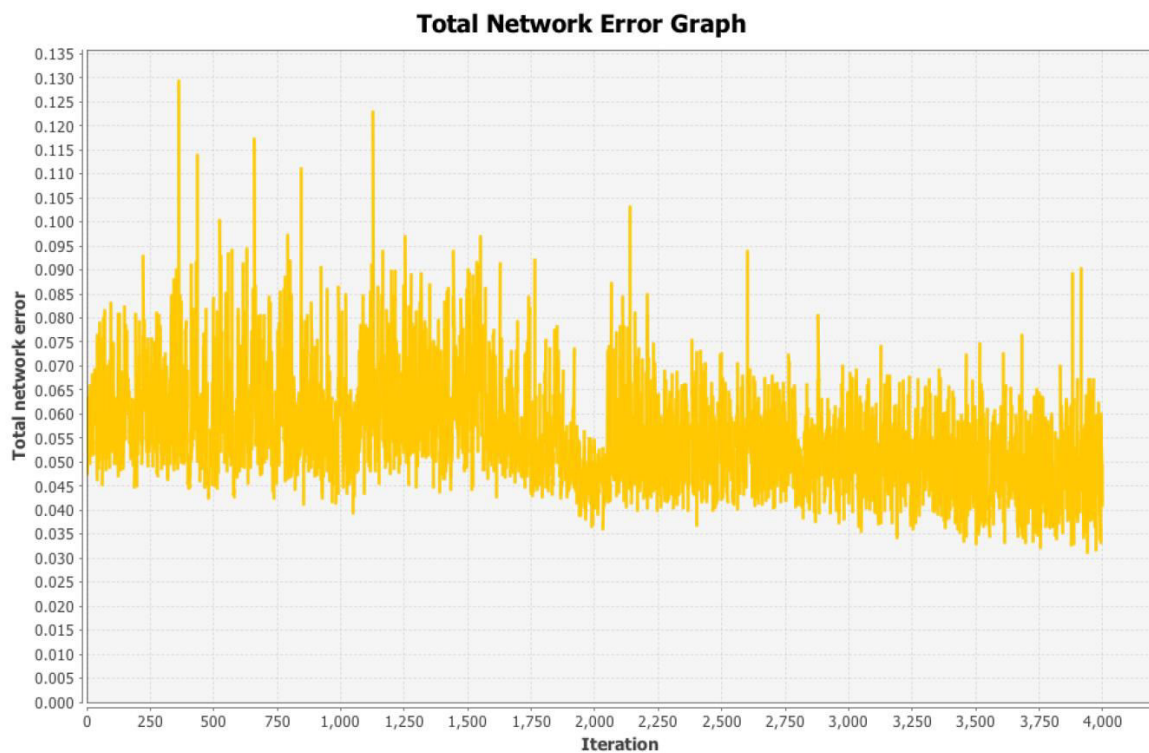
## Додаток Є2. Фрагмент вхідних даних для навчання нейромережі

Input1	Input2	Input3	Input4	Output1	Output2	Output3	Output4
0.10947856	0.63861406	0.01	5.5073676	0.0	1.0	1.0	0.0
0.19316407	0.9163126	0.0	0.7837353	0.0	0.0	0.0	0.0
0.15444793	0.6922254	0.01	1.7942944	0.0	0.0	1.0	0.0
0.12644622	0.25098956	0.01	11.44289	0.0	0.0	1.0	1.0
0.091482304	0.97520185	0.0	3.352251	0.0	1.0	0.0	0.0
0.19950846	0.49439418	0.01	4.8375993	0.0	0.0	1.0	0.0
0.19678265	0.99897176	0.0	6.16837	0.0	0.0	0.0	0.0
0.18323132	0.09944838	0.01	4.5046406	0.0	0.0	1.0	1.0
0.1335602	0.10037386	0.01	3.032916	0.0	0.0	1.0	0.0
0.15588662	0.24396874	0.01	8.175085	0.0	0.0	1.0	1.0
0.19807045	0.9223758	0.0	11.23053	0.0	0.0	0.0	0.0
0.095575035	0.2930271	0.01	5.895859	0.0	1.0	1.0	1.0
0.09633997	0.29264265	0.01	4.0825253	0.0	1.0	1.0	1.0
0.1738139	0.7501913	0.0	0.7836361	0.0	0.0	0.0	0.0
0.13790798	0.7553638	0.0	4.61362	0.0	0.0	0.0	0.0
0.15955645	0.028458178	0.01	5.5698223	0.0	0.0	1.0	1.0
0.11540229	0.052538276	0.01	5.8880267	0.0	0.0	1.0	1.0
0.14369583	0.21623576	0.01	1.0304832	0.0	0.0	1.0	0.0
0.13776281	0.8437897	0.0	6.2849274	0.0	0.0	0.0	0.0
0.16803214	0.90325475	0.0	5.1853437	0.0	0.0	0.0	0.0
0.097028404	0.81157565	0.0	2.7756357	0.0	1.0	0.0	0.0
0.16166197	0.41370785	0.01	5.189425	0.0	0.0	1.0	0.0
0.1322924	0.22637492	0.01	9.856878	0.0	0.0	1.0	1.0
0.09068438	0.075645864	0.01	8.014015	0.0	1.0	1.0	1.0
0.15188949	0.8884071	0.0	2.18511	0.0	0.0	0.0	0.0
0.20467526	0.17396659	0.01	5.9541683	0.0	0.0	1.0	1.0
0.18668398	0.7120831	0.0	11.589514	0.0	0.0	0.0	0.0
0.15424116	0.17957479	0.01	3.8476887	0.0	0.0	1.0	0.0
0.08721051	0.44416505	0.01	10.628078	0.0	1.0	1.0	0.0
0.11858613	0.78411895	0.0	11.750435	0.0	0.0	0.0	0.0
0.16735423	0.5442909	0.01	3.1109562	0.0	0.0	1.0	0.0
0.18806441	0.16681312	0.01	7.458541	0.0	0.0	1.0	1.0
0.15067707	0.40586323	0.01	0.18296432	0.0	0.0	1.0	0.0
0.09051018	0.6399994	0.01	9.795227	0.0	1.0	1.0	0.0
0.17137633	0.1430769	0.01	10.5737095	0.0	0.0	1.0	1.0

## Додаток Є3. Результати навчання нейромережі ітерації 1-2000



## Додаток Є4. Результати навчання нейромережі ітерації 2001-6000



## Додаток Є5. Набір даних для перевірки нейромережі

Input1	Input2	Input3	Input4	Output1	Output2	Output3	Output4
0.13094313	0.34675694	0.01	6.852005	0.0	0.0	1.0	1.0
0.16457577	0.729118	0.0	1.4106617	0.0	0.0	0.0	0.0
0.15023859	0.9891782	0.0	2.4033852	0.0	0.0	0.0	0.0
0.10224877	0.32473415	0.01	3.3112707	0.0	1.0	1.0	0.0
0.10267549	0.79803306	0.0	0.8313589	0.0	1.0	0.0	0.0
0.20763032	0.7239784	0.0	2.346552	0.0	0.0	0.0	0.0
0.10184588	0.54612374	0.01	3.7935534	0.0	1.0	1.0	0.0
0.19630063	0.2553997	0.01	10.681404	0.0	0.0	1.0	1.0
0.14965099	0.75542414	0.0	7.230713	0.0	0.0	0.0	0.0
0.13659352	0.5035774	0.01	6.49417	0.0	0.0	1.0	0.0
0.09489795	0.51035607	0.01	5.4921026	0.0	1.0	1.0	0.0
0.14234191	0.6015594	0.01	2.036129	0.0	0.0	1.0	0.0
0.1362008	0.7214563	0.0	2.1835299	0.0	0.0	0.0	0.0
0.17781684	0.66114074	0.01	7.193281	0.0	0.0	1.0	0.0
0.09065746	0.95847785	0.0	10.5579605	0.0	1.0	0.0	0.0
0.18961297	0.38665795	0.01	10.485887	0.0	0.0	1.0	1.0
0.14879115	0.09800559	0.01	9.017643	0.0	0.0	1.0	1.0
0.15303887	0.55710477	0.01	7.089011	0.0	0.0	1.0	0.0
0.114832506	0.59466785	0.01	2.591838	0.0	0.0	1.0	0.0
0.15783256	0.09561938	0.01	10.453026	0.0	0.0	1.0	1.0

## Додаток Є6. Вихідні результати перевірки навчання нейромережі

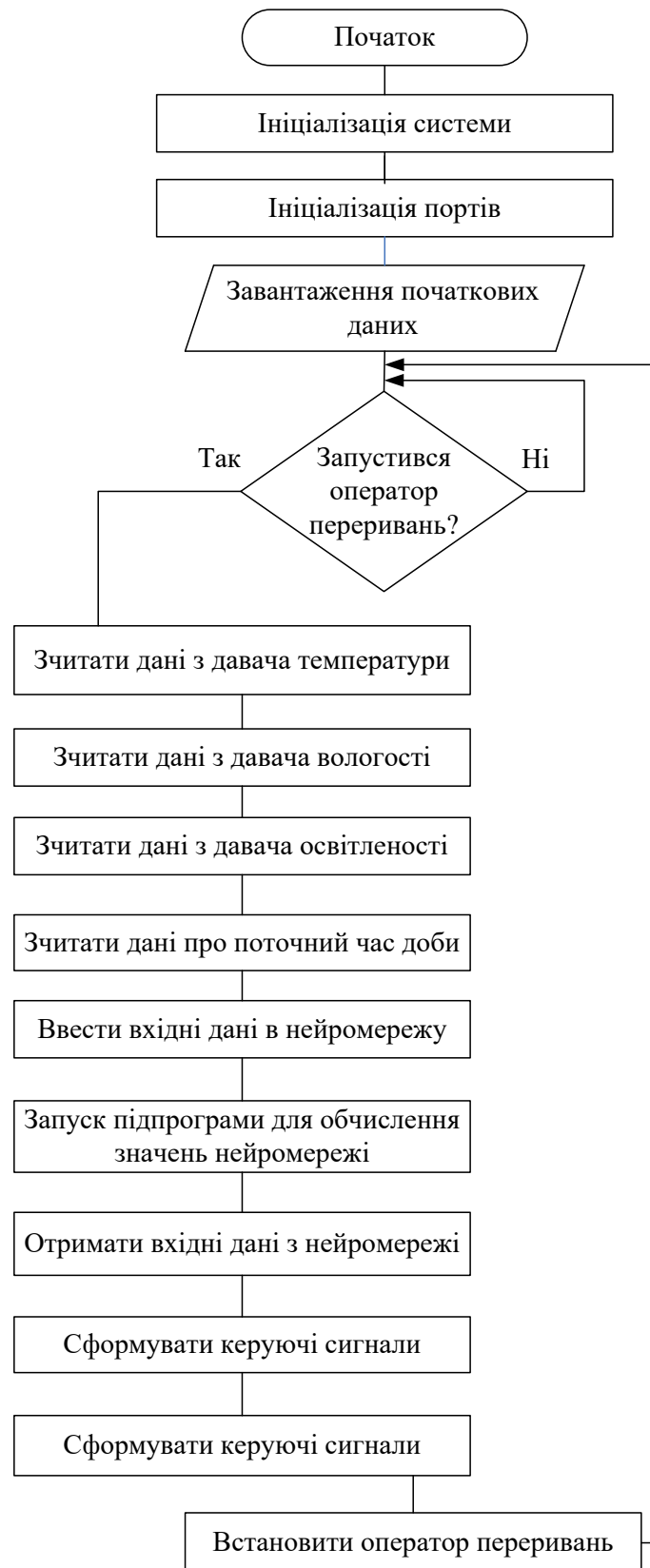
```

Input: 0.1309; 0.3468; 0.01; 6.852; Output: 0.0017; 0.0781; 1; 0.998; Desired output: 0; 0; 1; 1; Error: 0.0017; 0.0781; 0; -0.002;
Input: 0.1646; 0.7291; 0; 1.4107; Output: 0.0003; 0.0511; 0.0881; 0; Desired output: 0; 0; 0; 0; Error: 0.0003; 0.0511; 0.0881; 0;
Input: 0.1502; 0.9892; 0; 2.4034; Output: 0.0002; 0.0667; 0; 0; Desired output: 0; 0; 0; 0; Error: 0.0002; 0.0667; 0; 0;
Input: 0.1022; 0.3247; 0.01; 3.3113; Output: 0.0004; 0.9966; 1; 0.3946; Desired output: 0; 1; 1; 0; Error: 0.0004; -0.0034; -0; 0.3946;
Input: 0.1027; 0.798; 0; 0.8314; Output: 0.0003; 0.6257; 0.0001; 0; Desired output: 0; 1; 0; 0; Error: 0.0003; -0.3743; 0.0001; 0;
Input: 0.2076; 0.724; 0; 2.3466; Output: 0.0004; 0.0295; 0.1306; 0; Desired output: 0; 0; 0; 0; Error: 0.0004; 0.0295; 0.1306; 0;
Input: 0.1018; 0.5461; 0.01; 3.7936; Output: 0.0016; 0.9991; 1; 0; Desired output: 0; 1; 1; 0; Error: 0.0016; -0.0009; -0; 0;
Input: 0.1963; 0.2554; 0.01; 10.6814; Output: 0.0006; 0.0001; 1; 0.9963; Desired output: 0; 0; 1; 1; Error: 0.0006; 0.0001; 0; -0.0037;
Input: 0.1497; 0.7554; 0; 7.2307; Output: 0.0007; 0; 0.2693; 0; Desired output: 0; 0; 0; 0; Error: 0.0007; 0; 0.2693; 0;
Input: 0.1366; 0.5036; 0.01; 6.4942; Output: 0.0026; 0.0047; 1; 0.0014; Desired output: 0; 0; 1; 0; Error: 0.0026; 0.0047; -0; 0.0014;
Input: 0.0949; 0.5104; 0.01; 5.4921; Output: 0.0035; 0.9591; 1; 0.0011; Desired output: 0; 1; 1; 0; Error: 0.0035; -0.0409; -0; 0.0011;
Input: 0.1423; 0.6016; 0.01; 2.0361; Output: 0.0004; 0.0852; 1; 0; Desired output: 0; 0; 1; 0; Error: 0.0004; 0.0852; -0; 0;
Input: 0.1362; 0.7215; 0; 2.1835; Output: 0.0003; 0.1332; 0.0449; 0; Desired output: 0; 0; 0; 0; Error: 0.0003; 0.1332; 0.0449; 0;
Input: 0.1778; 0.6611; 0.01; 7.1933; Output: 0.0012; 0; 0.9994; 0; Desired output: 0; 0; 1; 0; Error: 0.0012; 0; -0.0006; 0;
Input: 0.0907; 0.9585; 0; 10.558; Output: 0.0024; 0.5177; 0.085; 0; Desired output: 0; 1; 0; 0; Error: 0.0024; -0.4823; 0.085; 0;
Input: 0.1896; 0.3867; 0.01; 10.4859; Output: 0.0012; 0; 1; 0.0072; Desired output: 0; 0; 1; 1; Error: 0.0012; 0; -0; -0.9928;
Input: 0.1488; 0.098; 0.01; 9.0176; Output: 0.0014; 0.1849; 1; 1; Desired output: 0; 0; 1; 1; Error: 0.0014; 0.1849; 0; -0;
Input: 0.153; 0.5571; 0.01; 7.089; Output: 0.0019; 0.0001; 1; 0; Desired output: 0; 0; 1; 0; Error: 0.0019; 0.0001; -0; 0;
Input: 0.1148; 0.5947; 0.01; 2.5918; Output: 0.0008; 0.9332; 1; 0; Desired output: 0; 0; 1; 0; Error: 0.0008; 0.9332; -0; 0;
Input: 0.1578; 0.0956; 0.01; 10.453; Output: 0.0014; 0.1928; 1; 1; Desired output: 0; 0; 1; 1; Error: 0.0014; 0.1928; 0; -0;
Total Mean Square Error: 0.032548308367788305

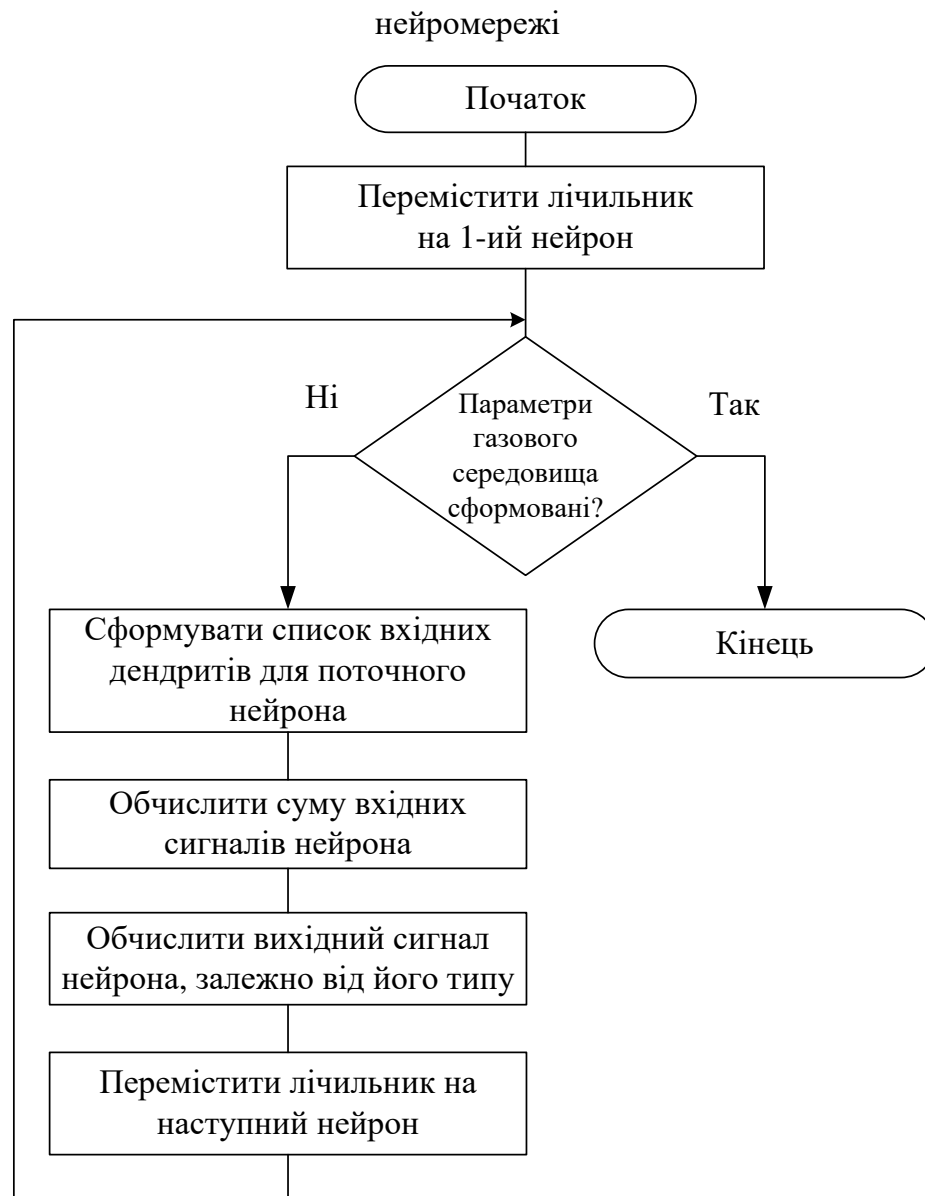
```



## Додаток Є7. Загальний алгоритм роботи нейроконтролера



Додаток Є8. Блок-схема алгоритму роботи підпрограми для симуляції роботи



## Додаток Ж. Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження

**“ЗАТВЕРДЖУЮ”**

Заст. директора з науково-технічної роботи  
Фізико-механічного інституту  
ім. Г.В. Карпенка НАН України  
І.М. Андрейко  
“ ” 2018 р.

**АКТ**

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
**ТЕСЛЮКА ТАРАСА ВАСИЛЬОВИЧА**  
«Методи та засоби збору і опрацювання даних в системах управління  
енергоефективністю підприємства»

Даним актом засвідчується, що наступні наукові результати, отримані Теслюком Т. В. в дисертаційній роботі «Методи та засоби збору і опрацювання даних в системах управління енергоефективністю підприємства», впроваджені в процесі розробки перспективних радіоелектронних систем, а саме:

- метод синтезу засобів збору і опрацювання даних в системах управління енергоефективністю підприємства, який, на відміну від існуючих, за рахунок врахування інтерфейсів зв'язку базових складових та їх параметрів забезпечує зменшення апаратно-часових затрат;
- метод безконфліктного обміну даними, який за рахунок узгодження інтенсивності надходження даних з інтенсивністю доступу до засобів обміну забезпечує визначення мінімальної швидкодії пам'яті для синтезу засобів обміну в реальному часі з високими техніко-економічними показниками.
- інформаційна технологія збору та опрацювання даних в системах управління енергоефективністю підприємства.

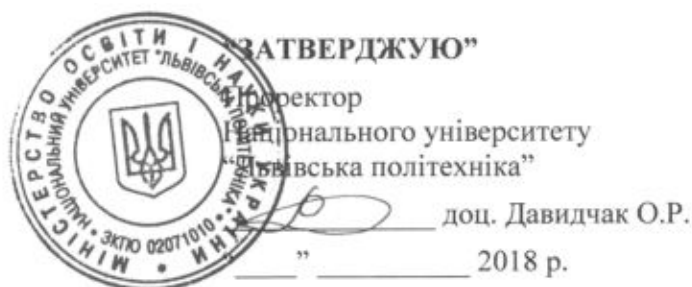
Отримані в дисертаційній роботі результати представляють практичну цінність при розробленні програмно-апаратних засобів для автоматизації синтезу мікроконтролерних систем. Запропоновані методи порівняно з відомими відзначаються ефективністю та високою точністю. Це дозволяє, застосовуючи розроблені методи, підвищити ефективність автоматизованого синтезу мікроконтролерних систем і уникати, при цьому, дорогих та довготривалих фізичних експериментальних досліджень та випробувань.

Даний акт не є основою для проведення фінансових взаєморозрахунків.

Завідувач відділу методів  
та систем дистанційного зондування  
Фізико-механічного інституту  
ім. Г.В. Карпенка НАН України,  
д.т.н., проф.



Б.П. Русин



### АКТ

про впровадження в навчальний процес кафедри автоматизованих систем управління Національного університету "Львівська політехніка" результатів дисертаційної роботи Теслюка Тараса Васильовича на тему «Методи та засоби збору і опрацювання даних в системах управління енергоефективністю підприємства»

Даний акт складений про те, що результати дисертаційної роботи Теслюка Тараса Васильовича впроваджені і використані в навчальному процесі кафедри автоматизованих систем управління Національного університету "Львівська політехніка" для студентів спеціальності 122 «Комп'ютерні науки». Зокрема при викладанні дисциплін:

- «Технології обчислювального інтелекту» – метод реалізації засобів опрацювання даних з використанням нейромереж на основі паралельного таблично-алгоритмічного обчислення скалярного добутку та математична і фізична моделі нейроконтролера опрацювання нечітких даних. Метод та моделі дають змогу ознайомити студентів з сучасним математичним забезпеченням технологій обчислювального інтелекту.

- «Управління і підтримка рішень у складних системах» – метод синтезу засобів збору і опрацювання даних в системах управління енергоефективністю підприємства, який ґрунтується на використанні методів багатокритеріальної оптимізації та модель на основі теорії ієрархічних мереж Петрі для аналізу процесів в багаторівневих системах управління енергоефективністю підприємства. Метод та модель дають змогу ознайомити студентів з сучасним математичним забезпеченням синтезу та аналізу складних ієрархічних систем.

Доцент кафедри АСУ,  
к.т.н., доцент

Ю. В. Цимбал

Завідувач кафедри АСУ,  
д.т.н., професор

І. Г. Цмоць

## Додаток Ж1. Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Теслюк Т.В., Цмоць І.Г., Ємець В.Ф., Зелінський А.Я., Коваль В.Я. Метод синтезу структур компонентів системи управління технологічними процесами. *Моделювання та інформаційні технології: Збірник наукових праць. Інститут моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України*. 2018. Вип.83. С. 165–173.
2. Teslyuk T., Tsmots I., Teslyuk V., Medykovskyy M., Opotyak Y. Architecture and Models for System-Level Computer-Aided Design of the Management System of Energy Efficiency of Technological Processes at the Enterprise. In: Shakhovska N., Stepashko V. (eds) *Advances in Intelligent Systems and Computing II. CSIT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham. 2017. Vol. 689. – P. 538–557.
3. Цмоць І.Г., Теслюк Т.В., Машевська М.В., Теслюк В.М. Модель організації обміну та збереження даних у багаторівневих системах управління технологічними процесами. *Науковий Вісник НЛТУ України*. 2017. Вип. 27. № 1, С. 197–202.
4. Цмоць І.Г., Цимбал Ю.В., Скорохода О.В., Хавалко В.М., Теслюк Т.В. Апаратна реалізація нейромережових засобів шифрування-дешифрування інформаційних потоків даних. *Моделювання та інформаційні технології: Збірник наукових праць. Інститут моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України*. 2018. Вип. 82. С. 117–123.
5. Tsmots I., Teslyuk V., Teslyuk T., Ihnatyev I. Basic Components of Neuronetworks with Parallel Vertical Group Data Real-Time Processing. In: Shakhovska N., Stepashko V. (eds) *Advances in Intelligent Systems and Computing II. CSIT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham. 2017. Vol. 689. P. 558–576.
6. Tsmots I., Medykovskyy M., Skorokhoda A., Teslyuk T. Design of Intelligent Component of Hierarchical Control System. *ECONTECHMOD. An International Quarterly Journal*. 2016. Vol. 05. No. 2. P. 3–10.

7. Цмоць І.Г., Теслюк Т.В. Структура та моделі роботи системи управління мікрокліматом мінітеплиці. *Комп'ютерні науки та інформаційні технології: Вісник НУ "ЛП"*. 2016. № 843. С. 228–237.

8. Цмоць І.Г., Теслюк Т.В. Коваль В.Я., Веніков Д. П., Притуляк Я. Г. Розроблення інформаційних моделей та БД для системи автоматизації структурного синтезу з використанням морфологічного методу. *Моделювання та інформаційні технології: Збірник наукових праць. Інститут моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України*. 2018. Вип. 82. С. 185–192.

9. Теслюк Т., Цмоць І., Опотяк Ю., Теслюк В. Архітектура багаторівневої системи управління енергоефективністю регіону. *Комп'ютерні науки та інформаційні технології: Вісник НУ "ЛП"*. 2017. № 864. С. 201–209.

10. Денисюк П.Ю. Теслюк В.М., Перейма М.Є., Теслюк Т.В. Використання ієрархічних мереж Петрі для моделювання МЕМС. *Науковий Вісник НЛТУ України*. 2011. Вип. 21.17. С. 340–343.

11. Береговський В.В., Теслюк В.М., Денисюк П.Ю., Теслюк Т.В. Методи та моделі автоматизованого проектування системи "Інтелектуального будинку" на базі нейроконтролерів. *Науковий вісник НЛТУ України*. – 2016. – Вип. 26.7, С. 342-349.

12. Теслюк Т. Аналіз динаміки функціонування багаторівневих систем з використанням моделей на основі ієрархічних мереж Петрі. *Науковий Вісник НЛТУ України*. 2018. Том. 28. № 8. С. 149–154.

13. Цмоць І.Г., Батюк А.Є., Яворський А.В., Теслюк Т.В. Система моніторингу технологічних процесів «розумного підприємства». *Комп'ютерні науки та інформаційні технології: Вісник НУ "ЛП"*. 2018. № 887. С. 10–17.

14. Теслюк Т. В., Зелінський А.Я., Угрин Л.Є., Коваль В. Я. Система розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації з використанням побудови множини оптимальних рішень – Парето. *Моделювання та інформаційні технології: Збірник наукових праць. Інститут моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України*. 2018. Вип. 82. С. 148–153.

15. Teslyuk T.V., Tsmots I.G., Teslyuk V.M., Medykovskyy M.O.

Optimization of the structure of wind power station with the use of the branch and bound method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 2, Issue 8 (86). P. 4–9.

16. Teslyuk V., Beregovskiy V., Denysyuk P., Teslyuk T., Lozynskiy A. Development and Implementation of the Technical Accident Prevention Subsystem for the Smart Home System. *I.J. Intelligent Systems and Applications*, Jan. 2018. Vol. 10, No. 1, P. 1–8.

17. Teslyuk T., Tsmots I., Teslyuk V., Medykovskyy M., Opotyak Y. Architecture of the management system of energy efficiency of technological processes at the enterprise. *Proc. of the XII-th Intern. Conf. of Computer Science & Information Technologies 2017 (CSIT'2017)*. Lviv. 2017. P. 429–433.

18. Teslyuk T.V., Tsmots I.H., Teslyuk V.M., Medykovskyy M.O., Holovatyy A.I. Intelligent components of multilevel system for energy efficiency management in regional economy. *Proc. of the XIV Intern. Conf. on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2017)*. Lviv – Polyana., Ukraine. 2017. P. 319–323.

19. Tsmots I., Skorokhoda O., Teslyuk T., Rabyk V. Design Features of Hardware and Software Tools for Intelligent Processing of Intensive Data Streams. *Proceeding of the 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing, DSMP, 23 - 27 August 2016 Lviv, Ukraine*. 2016. P. 332–335.

20. Tsmots I., Teslyuk T., Opotyak Y. Selection of Hardware Features and Synthesis of Multilevel Control System Components of Energy Efficiency of Production Processes. *Proc. of the XIV-th Intern. Conf. on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design MEMSTECH'2018, 18 - 22 April 2018 Polyana, Lviv, Ukraine*. 2018. P. 186–190.

21. Tsmots I., Skorokhoda O., Tsymbal Y., Teslyuk T., Khavalko V. Neural-Like Means for Data Streams Encryption and Decryption in Real Time. *Proceeding of the 2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing, DSMP, 21 - 25 August 2018 Lviv, Ukraine*. 2018. P. 438–443.

22. Teslyuk T., Denysyuk P., Savitska O., Kobyliuk Y., Voronyak R.

Modeling of Mobile Robot Systems Using Petri Nets. *Proc. of the IX-th Intern. Conf. on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH'2013)*.

Lviv: Publisher Lviv Polytechnic Publishing House. 2013. P. 169–171.

23. Denysyuk P., Matviichuk K., Duda M., Teslyuk T., Kobyluk Y. Technical Support for Mobile Robot System RoboCAD. *Proc. of the XIIth Inter. Conf. On Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, (CADSM'2013)*. Lviv-Polyana, Ukraine. 2013. P.431–432.

24. Denysyuk P., Teslyuk T., Teneta K., Medvid A., Sherstniakova O. An Algorithm of Determining the Direction of Motion of Mobile Robotic System. *Proc. of the IX-th Intern. Conf. on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design 2013 (MEMSTECH'2013)*. Lviv: Publisher Lviv Polytechnic Publishing House. 2013. P. 149–150.

25. Denysyuk P., Teslyuk T., Beregovskyy V., Cheremisin I., Duda M. Neural Controller of Intelligent Building Climate Control Subsystem on the Basis of a Multilayer Perceptron. *Proc. of the VII-th Intern. Conf. of Computer Science & Information Technologies 2012 (CSIT'2012)*. Lviv: Publisher Lviv Polytechnic. 2012. P. 26–27.

26. Teslyuk T., Denysyuk P., Kernytskyi A., Teslyuk V. Automated Control System for Arduino and Android Based Intelligent Greenhouse. *Proc. of the XIth Inter. Conf. on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, (MEMSTECH'2015)*. Lviv-Polyana, Ukraine. 2015. P. 7–10.

27. Теслюк Т. В., Цмоць І. Г., Медиковський М. О., Машевська М. В., Теслюк В. М. Система автоматизованого синтезу пристроїв на базі мікроконтролерів. *Матеріали VIII-ої Українсько-польської науково-практичної конференції “Електроніка та інформаційні технології” (ЕЛІТ-2017)*, 27-30 серпня 2017. Львів-Чинадієво, Україна. 2017. С. 142–145.