

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПАЛАМАР АНДРІЙ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 004.89:681.518

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ**

05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

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

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник:
Карпінський Микола Петрович,
доктор технічних наук, професор

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

вчений секретар спеціалізованої вченої ради

/М. Є. Фриз/

Тернопіль – 2021

АНОТАЦІЯ

Паламар А.М. Методи і засоби покращення технічних характеристик інтелектуальних систем безперебійного живлення для телекомунікаційних комплексів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-практичної задачі, яка полягає в розробленні та дослідженні моделей, методів та програмно-апаратних засобів для інтелектуальних систем керування та моніторингу джерел безперебійного живлення з метою підвищення їх надійності та енергоефективності.

У *вступі* розкрито стан наукової проблеми, обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, представлено зв'язок роботи з науковими темами, сформульовано мету та основні задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, викладено наукову новизну отриманих результатів, їх практичне значення. Наведено інформацію про апробацію результатів роботи, їх висвітлення в наукових працях здобувача та особистий внесок дисертанта.

У *першому розділі* роботи проведено огляд та аналіз методів керування та контролю стану промислових джерел безперебійного електроживлення (ДБЖ). Проведено їх класифікацію ДБЖ та розглянуто особливості їх функціонування.

Проведено критичний аналіз існуючих сучасних комп'ютеризованих систем керування та моніторингу промислових джерел безперебійного електроживлення з точки зору їх надійності та енергоефективності. В результаті проведеного огляду наукових праць встановлено, що сучасний стан розвитку апаратних засобів промислових джерел безперебійного живлення характеризується переважно високим рівнем резервування випрямляючих

модулів для підвищення надійності та низьким рівнем завантаженості, що знижує енергоефективність їх функціонування.

Здійснено огляд відомих методів та засобів підвищення ефективності роботи джерел безперебійного електроживлення. Визначено, що перспективним напрямком розвитку комп'ютеризованих систем керування та моніторингу ДБЖ є удосконалення існуючих та розробка нових методів підвищення показників надійності, енергоефективності та якості джерел безперебійного живлення на основі синтезу моделей та високоефективних алгоритмів для покращення їх технічних характеристик. Сформульовано вимоги до інтелектуальної комп'ютеризованої системи для керування та моніторингу джерел безперебійного живлення. Визначені завдання, які в цій сфері на сьогодні залишаються невирішеними. Сформульовано та обґрунтовано основні задачі дисертаційного дослідження.

У *другому розділі* дисертаційної роботи розроблені моделі та методи підвищення показників енергоефективності та надійності роботи джерел безперебійного живлення. Критерії одночасного підвищення показників надійності та енергоефективності постачання електроенергії з використанням джерел безперебійного живлення є суперечливими. В цій ситуації задача оптимізації системи керування джерел безперебійного живлення є багатокритеріальною. Для вирішення цієї задачі в дисертаційній роботі використовується метод імітаційного моделювання, який полягає в розробці та дослідженні моделі комп'ютеризованої системи управління компонентами ДБЖ з подальшим підтвердженням її адекватності за допомогою експериментальних досліджень на реальному об'єкті.

Для підвищення енергоефективності джерел безперебійного живлення запропоновано метод адаптивного регулювання рівня завантаженості випрямляючих модулів ДБЖ в межах наперед заданого оптимального діапазону значень, який враховує коефіцієнт завантаженості випрямлячів та виконує його корекцію в режимі реального часу. Для цього в структуру ДБЖ було додано модулі керування випрямлячами. Розроблений метод був впроваджений в

реальній системі керування модульним джерелом безперебійного живлення. В результаті експериментальних досліджень було встановлено, що застосування запропонованого методу підвищує ККД джерела безперебійного живлення в порівнянні з традиційними методами керування компонентами ДБЖ, які характеризуються низьким рівнем завантаженості.

Для підвищення надійності функціонування ДБЖ запропонований метод керування випрямляючими модулями, який передбачає адаптивне циклічне зміщення активних випрямлячів. Суть цього методу полягає у послідовному включенні в роботу кожного наступного модуля з числа їх ненавантаженого резерву та відключенні попереднього.

Для дослідження ефективності запропонованих методів за критеріями співвідношенням показників надійності та енергоефективності було розроблено та досліджено імітаційну модель системи керування, яка враховує стохастичність зміни споживання електроенергії телекомунікаційним обладнанням, зовнішні і внутрішні дестабілізуючі фактори на функціонування ДБЖ. Результати імітаційного моделювання показали, що запропоновані методи забезпечують рівномірний час роботи випрямляючих модулів та зниження загальної тривалості їх роботи.

Метою *третього розділу* дисертації є удосконалення методів інтелектуального керування модульними джерелами безперебійного живлення на основі використання адаптивних алгоритмів із застосуванням технологій штучних нейронних мереж (ШНМ).

Для керування компонентами ДБЖ запропонована схема нейромережевого управління процесом заряду акумуляторних батарей (АБ) з адаптивним налаштуванням коефіцієнтів ПД-регулювання. Засобами імітаційного моделювання в середовищі Neural Network Toolbox синтезовано ШНМ з прямим розповсюдженням сигналу та зворотним поширенням помилки. Для навчання штучної нейронної мережі використовувались дані з реального ДБЖ, отримані експериментальним шляхом. На входи ШНМ подавалась навчальні послідовності, які являють собою значення електричних параметрів ДБЖ:

вихідної напруги, струму навантаження, струму заряду двох груп АБ, температури АБ. Виходи ШНМ формували три ПД-коефіцієнти для регулювання струму заряду акумуляторних батарей. Для перевірки ефективності синтезованої ШНМ були проведені дослідження на тестових послідовностях, які показали, що при зміні параметрів системи живлення адаптивний регулятор на основі ШНМ показує більшу точність регулювання порівняно зі звичайним ПД-регулятором.

Запропоновано застосувати ШНМ для задачі прогнозування в системі електропостачання з застосуванням модульних ДБЖ. Необхідність прогнозування рівня споживання електроенергії на середньострокову та короткострокову перспективу пов'язана зі знаходженням компромісу між потребою забезпечення високих показників надійності ДБЖ шляхом резервування його компонентів та потребою досягнення високої енергоефективності шляхом підвищення рівня завантаженості випрямляючих модулів та збільшення, таким чином, їхнього ККД.

Для реалізації задачі прогнозування, було обрано рекурентну нейронну мережу Елмана. Запропонована ШНМ містить один нейрон у вихідному шарі та десять нейронів у проміжному шарі а також відповідну кількість ліній затримки у контекстному шарі. До типової структури ШНМ Елмана було внесено зміни шляхом додавання зворотних зв'язків через лінії динамічної затримки від виходу до вхідних нейронів. Це дозволило детальніше враховувати передісторію процесів, які відбуваються в ДБЖ, і накопичувати в них інформацію. Результати дослідження продемонстрували, що запропонована ШНМ з Елмана з додатковими зворотними зв'язками дала змогу підвищити точність прогнозування рівня споживання електроенергії обладнанням, яке живиться від ДБЖ.

У *четвертому розділі* описаний завершальний етап дисертаційного дослідження – практична реалізація комп'ютеризованої системи для керування та моніторингу джерел безперебійного живлення.

Для підвищення ефективності перетворення електроенергії та покращення якості вихідної напруги у випрямляючих модулях ДБЖ було використано резонансні імпульсні перетворювачі, впровадження яких забезпечило зниження рівня імпульсних завад та психофотричного шуму, що надзвичайно важливо при електропостачанні обладнання телекомунікаційних комплексів, в яких здійснюється опрацювання звукових сигналів в режимі реального часу.

З метою реалізації запропонованих методів розроблено апаратне забезпечення комп'ютеризованої системи для керування та моніторингу ДБЖ. Зокрема прототип центрального керуючого модуля ДБЖ та модуль керування випрямлячами. Для реалізації ефективної роботи апаратних засобів комп'ютеризованої системи на основі запропонованих в дисертації моделей та методів розроблене відповідне програмне забезпечення для мікроконтролерів центрального керуючого модуля, модуля керування випрямлячами, а також спеціалізоване ПЗ для дистанційного моніторингу стану та електричних параметрів ДБЖ з графічним інтерфейсом користувача, яке призначене для візуалізації процесів функціонування системи, перегляду архівних даних, вибору режимів роботи та зміни параметрів.

Проведені експериментальні дослідження, в межах яких дослідна установка модульного ДБЖ тестувалася в лабораторних умовах з імітуванням екстремальних умов експлуатації. Після опрацювання статистичних даних, отриманих в результаті проведених досліджень, було виявлено, що при застосуванні запропонованих методів збільшується середній час напрацювання на відмову випрямляючих модулів ДБЖ.

Практичне впровадження результатів дисертаційної роботи, шляхом розробки та дослідження компонентів комп'ютеризованої системи керування та моніторингу джерел безперебійного живлення, підтвердило ефективність запропонованих теоретичних рішень.

Ключові слова: комп'ютеризована система керування, джерело безперебійного живлення, імітаційне моделювання, штучні нейронні мережі, програмне забезпечення.

ABSTRACT

Palamar A.M. Methods and means of improving the technical characteristics of intelligent uninterruptible power supply systems for telecommunication complexes. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for a candidate degree in technical science on specialty 05.13.05 – computer systems and components. – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2021.

The thesis is devoted to solving an important scientific and practical problem, which is to develop and study models, methods and software and hardware for intelligent control systems and monitoring of uninterruptible power supplies to increase their reliability and energy efficiency.

The *introduction* reveals the state of the scientific problem, substantiates the relevance of the thesis research topic, presents the connection of work with scientific topics, formulates the purpose and main objectives of the research, defines the object, subject and methods of research, outlines the scientific novelty of the results, their practical significance. The information on approbation of results of work, their coverage in scientific works of the applicant and personal contribution of the thesis is resulted.

The *first section* of the work reviews and analyzes the methods of control and monitoring of industrial uninterruptible power supplies (UPS). Their UPS classification is carried out and the peculiarities of their functioning are considered.

A critical analysis of existing modern computerized control systems and monitoring of industrial uninterruptible power supplies in terms of their reliability and energy efficiency is implemented. As a result of the review of scientific works it is established that the current state of development of hardware of industrial uninterruptible power supplies is characterized mainly by high level of redundancy of rectifier modules for increase of reliability and low level of loading that reduces energy efficiency of their functioning.

A review of known methods and means of improving the efficiency of uninterruptible power supplies is realized. It is determined that a promising direction of development of computerized control and monitoring systems of UPS is the improvement of existing and development of new methods to improve the reliability, energy efficiency and quality of uninterruptible power supplies based on synthesis of models and highly efficient algorithms to improve their technical characteristics. The requirements for an intelligent computerized system for control and monitoring of uninterruptible power supplies are formulated. The tasks that remain unsolved in this area today have been identified. The main tasks of the thesis research are formulated and substantiated.

In the *second section* of the thesis models and methods of increasing the indicators of energy efficiency and reliability of uninterruptible power supplies are developed. Criteria for simultaneously increasing the reliability and energy efficiency of electricity supply using uninterruptible power supplies are contradictory. In this situation, the task of optimizing the control system of uninterruptible power supplies is multi-criteria. To solve this problem, the thesis uses the method of simulation, which consists in the development and study of a model of a computerized control system for UPS components with subsequent confirmation of its adequacy through experimental research on a real object.

To increase the energy efficiency of uninterruptible power supplies, a method of adaptive control of the load level of UPS rectifier modules within a predetermined optimal range of values is proposed, which takes into account the rectifier load factor and performs its correction in real time. To do this, rectifier control modules were added to the UPS structure. The developed method was implemented in a real control system of a modular uninterruptible power supply. As a result of experimental studies, it was found that the application of the proposed method increases the efficiency of the uninterruptible power supply compared to traditional methods of control of UPS components, which are characterized by a low level of load.

To increase the reliability of the UPS, a method of controlling rectifier modules is proposed, which provides for adaptive cyclic displacement of active rectifiers. The essence of this method is to sequentially include in the work of each subsequent module from among their unloaded reserve and disable the previous one.

To study the effectiveness of the proposed methods on the criteria of reliability and energy efficiency, a simulation model of the control system was developed and studied, which takes into account the stochasticity of changes in electricity consumption by telecommunications equipment, external and internal destabilizing factors for UPS operation. The results of simulation showed that the proposed methods provide a uniform operating time of the rectifier modules and reduce the overall duration of their operation.

The aim of the *third section* of the thesis is to improve the methods of intelligent control of modular uninterruptible power supplies based on the use of adaptive algorithms using artificial neural network (ANN) technologies.

To control the components of the UPS, a scheme of neural network control of the battery charge process with adaptive adjustment of PID control coefficients is proposed. Simulation simulations in the Neural Network Toolbox environment synthesize ANN with direct signal propagation and reverse error propagation. Experimental data from real UPS were used to train the artificial neural network. Training sequences were fed to the inputs of the ANN, which are the values of the electrical parameters of the UPS: output voltage, load current, charge current of two groups of AB, AB temperature. The outputs of the ANN formed three PID coefficients for regulating the battery charge current. To test the effectiveness of the synthesized ANN, studies were performed on test sequences, which showed that when changing the parameters of the power supply system adaptive regulator based on ANN shows greater control accuracy compared to conventional PID-regulator.

It is proposed to use ANN for the problem of forecasting in the power supply system using modular UPS. The necessity to forecast the level of electricity consumption in the medium and short term is related to finding a compromise between

the need to ensure high reliability of UPS by redundant components and the need to achieve high energy efficiency by increasing the load of rectifier modules and thus increase their efficiency.

To implement the prediction task, a recurrent Elman neural network was chosen. The proposed ANN contains one neuron in the source layer and ten neurons in the intermediate layer, as well as the corresponding number of delay lines in the context layer. The typical structure of the Elman ANN was modified by adding feedback through dynamic delay lines from the output to the input neurons. This allowed us to take into account the background of the processes that take place in the UPS, and accumulate information in them. The results of the study demonstrated that the proposed Elman ANN with additional feedback allowed to increase the accuracy of forecasting the level of electricity consumption by equipment powered by UPS.

The *fourth section* describes the final stage of the thesis research - the practical implementation of a computerized system for control and monitoring of uninterruptible power supplies.

Resonant pulse converters were used in the UPS rectifier modules to increase the efficiency of electricity conversion and to improve the quality of the output voltage. This implementation has provided a reduction in the level of impulse interference and psophometric noise, which is extremely important in the power supply of telecommunications equipment, which processes audio signals in real time.

In order to implement the proposed methods, the hardware of a computerized system for control and monitoring of UPS has been developed. In particular, a prototype of the central control module of the UPS and the control module of the rectifiers. To implement the effective operation of computer system hardware based on the models and methods proposed in the thesis, the appropriate software for microcontrollers of the central control module, rectifier control module, as well as specialized software for remote monitoring of electrical status and electrical parameters of UPS with graphical user interface designed to visualize the processes of system operation, view archival data, select operating modes and change parameters.

Experimental researches within which experimental installation of modular UPS was tested in laboratory conditions with simulation of extreme operating conditions are carried out. After processing the statistical data obtained as a result of research, it was found that the application of the proposed methods increases the average operating time of failure of the rectifier modules of the UPS.

The practical implementation of the thesis results by developing and researching the components of a computerized control system and monitoring for uninterruptible power supplies was confirmed the effectiveness of the proposed theoretical solutions.

Keywords: computerized control system, uninterruptible power supply, simulation modeling, artificial neural networks, software.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Palamar A., Pettai E., Beldjajev V. Control System for a Diesel Generator and UPS Based Microgrid. *Electrical, Control and Communication Engineering*. Riga, Latvia. 2010. Vol. 26, No. 1. P. 48–53. (Індексується в *Web of Science Core Collection*).

2. Palamar A., Karpinskyy M., Vodovozov V. Design and Implementation of a Digital Control and Monitoring System for an AC/DC UPS. *7th International Conference-Workshop «Compatibility and Power Electronics» (CPE 2011)*, Tallinn, Estonia. 2011. P. 173–177. (Індексується в *Scopus* та *Web of Science Core Collection*).

3. Palamar A. Control system simulation by modular uninterruptible power supply unit with adaptive regulation function. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, Ternopil, Ukraine. 2020. Vol. 98, No 2. P. 129–136. (Індексується в *Index Copernicus*).

4. Palamar A. Methods and means of increasing the reliability of computerized modular uninterruptible power supply system. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, Ternopil, Ukraine. 2020. Vol. 99, No 3. P. 133–141. (Індексується в *Index Copernicus*).

5. Паламар М., Пастернак Ю., Паламар А. Дослідження динамічних похибок системи прецизійного керування антеною з асинхронним електроприводом. *Вісник ТНТУ*. Тернопіль: ТНТУ. 2014. Вип. 76, № 4. С. 164–173. (Індексується в *Index Copernicus*).

6. Vasylykivskiy I., Ishchenko V., Pohrebennyk V., Palamar M., Palamar A. System of water objects pollution monitoring. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM 2017)*, Vienna, Austria. 2017. Vol. 17, No. 33. P. 355-362. (Індексується в *Scopus*).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Паламар М. І., Паламар А. М. Система керування і моніторингу пристроїв гарантованого електроживлення. *Праці II Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми й перспективи»*, Тернопіль. 2005. С. 135–139.

8. Palamar A., Pettai E. Microgrid for the Department of Electrical Drives and Power Electronics. *8th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering» and «Doctoral School of Energy and Geotechnology II»*, Pärnu, Estonia. 2010. P. 54–61.

9. Palamar A., Laugis J. Control System for Multiple Buildings Microgrid. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій»*, Тернопіль. 2010. С. 376–377.

10. Palamar A., Pettai E. Control Algorithm for a Diesel Generator Based Microgrid in Different Operation Modes. *9th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering» and «Doctoral School of Energy and Geotechnology II»*, Pärnu, Estonia. 2010. P. 89–94.

11. Palamar A., Karpinsky M. Control of an Uninterruptible Power Supply in a DC Microgrid System. *10th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering» and «Doctoral School of Energy and Geotechnology II»*, Pärnu, Estonia. 2011. P. 80–84.

12. Паламар А. М., Пастернак Ю. В. Модуль керування пристроєм гарантованого електроживлення постійного струму. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*: збірник тез доповідей, Тернопіль. 2013. С. 217.

13. Паламар А. М., Пастернак Ю. В., Паламар Я. М. Двох-процесорна інформаційно-вимірювальна система керування пристроєм безперебійного електроживлення. *Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*: збірник тез доповідей, Тернопіль. 2014. С. 211–212.

14. Паламар А. М., Осов'як І. І. Комп'ютерна інформаційно-вимірювальна система для моніторингу пристроїв безперебійного електроживлення. *Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми, перспективи»*, Тернопіль. 2015. С. 111–112.

15. Паламар А. М., Паламар М. О. Методи та засоби підвищення енергоефективності джерел безперебійного живлення для телекомунікаційних систем. *Матеріали XIX наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя*, Тернопіль. 2016. С. 169–170.

16. Паламар А. М. Комп'ютерна система для моніторингу параметрів джерел безперебійного живлення на основі технології Internet of Things. *Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій»*, Тернопіль. 2019. С. 208–209.

17. Паламар А. М. Програмно-апаратний комплекс для дистанційного моніторингу стану джерел безперебійного електроживлення. *Матеріали VII науково-технічної конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «Інформаційні моделі, системи та технології»*, Тернопіль. 2019. С. 132.

18. Паламар А. М. Моделювання алгоритму керування модульним джерелом безперебійного живлення з використанням діаграми станів. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 60 річчя з дня заснування ТНТУ та 175 річчя з дня народження Івана Пулюя*, Тернопіль. 2020. С. 172-173.

19. Паламар А. М. Функціональна схема інтелектуальної системи моніторингу джерел безперебійного живлення. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти*, Рівне. 2020. С 141-143.

20. Паламар А. М. Метод керування системою безперебійного живлення на основі прогнозування з використанням рекурентної нейронної мережі. *Матеріали ІХ міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь у світі сучасних технологій» за тематикою: «Використання інформаційних та комунікаційних технологій в сучасному цифровому суспільстві»*, Херсон. 2020. С 153-155.

21. Palamar A. Intelligent control and monitoring module for uninterruptible power supply system. *II International Scientific and Practical Conference «Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs» (MC&FPGA-2020)*, Kharkiv, Ukraine. 2020. P. 12-13.

22. Паламар А. М., Паламар М. О. Метод підвищення надійності компонентів модульної комп'ютеризованої системи безперебійного живлення. *Матеріали міжнародної наукової конференції «Іван Пулюй: життя в ім'я науки та України» (до 175-ліття від дня народження)*, Тернопіль. 2020. С. 91-92.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

23. Palamar M. I., Karpinskyu M. P., Palamar A. M. Neural network use in control system of antenna complex for information receive of earth remote sensing. *Електронне наукове фахове видання «Науковий вісник Донбасу»: Технічні науки. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://nvd.luguniv.edu.ua/archiv/NN6/08pmiers.pdf>*. 2008. Вип. 6, № 2.

24. Palamar M., Pasternak Y., Palamar A., Poikhalo A. Precision tracking of the trajectory LEO satellite by antenna with induction motors in the control system. *Proceedings of the 2017 IEEE 9th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2017)*, Bucharest, Romania. 2017. Vol. 2, P. 1051-1055. (*Індексується в Scopus та Web of Science Core Collection*).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	19
ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПОБУДОВИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ДЖЕРЕЛ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ.....	29
1.1 Інтелектуальні електричні мережі.....	29
1.1.1 Smart Grid.....	29
1.1.2 Microgrid	31
1.1.3 Накопичувачі електроенергії.....	33
1.2 Класифікація і принципи функціонування джерел безперебійного електроживлення.....	34
1.3 Огляд відомих методів та засобів підвищення ефективності керування джерелами безперебійного електроживлення	36
1.3.1 Критерії ефективності та вимоги до джерел безперебійного живлення	36
1.3.2 Аналіз підходів та методів підвищення показників надійності систем безперебійного живлення.....	37
1.3.3 Методи підвищення енергетичних показників ДБЖ	44
1.4 Огляд і критичний аналіз існуючих комп'ютеризованих систем для керування та моніторингу ДБЖ.....	46
1.5 Загальна концепція створення інтелектуальних систем керування джерелами безперебійного електроживлення.....	51
1.6 Формулювання напрямку та постановка задач дисертаційного дослідження	54
1.7 Висновки до розділу 1	55
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МОДУЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ.....	57

2.1 Структура комп'ютеризованої системи для моніторингу та керування компонентами джерела безперебійного живлення	57
2.2 Метод адаптивного регулювання рівня завантаженості випрямляючих модулів джерела безперебійного живлення	60
2.3 Розробка імітаційної моделі комп'ютеризованої системи управління компонентами джерела безперебійного живлення	65
2.4 Метод керування випрямляючими модулями джерела безперебійного живлення шляхом їх адаптивного циклічного зміщення....	70
2.5 Висновки до розділу 2	77
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ КЕРУВАННЯ КОМПОНЕНТАМИ МОДУЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ НА ОСНОВІ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	79
3.1 Удосконалення підсистеми керування ДБЖ в режимі регулювання струму заряду АБ	79
3.2 Синтез ШНМ для реалізації методу адаптивного ПД-регулювання струму заряду акумуляторних батарей.....	82
3.3 Застосування нейромережових технологій для задачі прогнозування споживання електроенергії	92
3.4 Синтез ШНМ для короткострокового прогнозування електроспоживання обладнанням, яке живиться від ДБЖ.....	96
3.5 Висновки до розділу 3	107
РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ДЖЕРЕЛ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ.....	108
4.1 Функціональне призначення комп'ютеризованої системи керування та моніторингу ДБЖ	108
4.2 Структура комп'ютеризованої системи керування та моніторингу джерел безперебійного живлення	110
4.3 Апаратне та схемотехнічне забезпечення компонентів комп'ютеризованої системи керування та моніторингу ДБЖ	112

4.3.1 Розробка апаратної частини центрального керуючого модуля ДБЖ	112
4.3.2 Розробка модуля для керування випрямлячами ДБЖ	122
4.4 Реалізація алгоритмічного і програмного забезпечення для комп'ютеризованої системи керування і моніторингу ДБЖ.....	123
4.4.1 Алгоритмічне забезпечення мікроконтролерів.....	123
4.4.2 Розробка програмного забезпечення для мікроконтролерів	133
4.4.3 Розробка програмного забезпечення для дистанційного моніторингу стану та електричних параметрів ДБЖ.....	135
4.5 Експериментальні дослідження комп'ютеризованої системи керування та моніторингу ДБЖ.....	139
4.5.1 Опис експериментальної установки	139
4.5.2 Експериментальні дослідження роботи комп'ютеризованої системи в режимі заряду акумуляторних батарей.....	146
4.5.3 Експериментальні дослідження роботи комп'ютеризованої системи в режимі енергоефективного керування випрямлячами.....	150
4.6 Висновки до розділу 4	153
ВИСНОВКИ.....	155
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	157
ДОДАТКИ.....	174
Додаток А Список публікацій здобувача за темою дисертації	174
Додаток Б Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	178
Додаток В Фрагменти програмного коду для керування та моніторингу джерел безперебійного живлення.....	182

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АБ – акумуляторна батарея;
- АПК – апаратно-програмний комплекс;
- АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
- ВМ – випрямляючий модуль;
- ДБЖ – джерело безперебійного живлення;
- ЕЖУ – електроживильна установка;
- ЕМ – енергетичний масив;
- КС – комп’ютеризована система;
- КСКМ – комп’ютеризована система керування та моніторингу;
- МК – мікроконтролер;
- МКВ – модуль керування випрямлячами;
- ПДМ – програма дистанційного моніторингу;
- ПЗ – програмне забезпечення;
- ПК – персональний комп’ютер;
- ППП – пакет прикладних програм;
- РЕКВ – режим енергоефективного керування випрямлячами;
- РКС – розподілена комп’ютеризована система;
- СК – система керування;
- ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;
- ЦКМ – центральний керуючий модуль;
- ШНМ – штучна нейронна мережа.

ВСТУП

Актуальність теми. На сьогоднішній день надзвичайно важливим завданням є забезпечення надійним та якісним енергопостачанням об'єктів критичної інфраструктури – таких, як системи зв'язку, телекомунікації, центри обробки даних, медичні заклади, банківські установи, тощо. Ціна проблем, спричинених недостатньою якістю та / або надійністю постачання електроенергії, може бути надзвичайно високою і включати в себе значні економічні збитки від простою, пошкодження дорогого обладнання чи втрату важливої інформації, а переривання електроживлення в медичних установах можуть призводити до загибелі людей. Для уникнення цих проблем необхідні надійні високоефективні промислові джерела безперебійного живлення (ДБЖ), які забезпечують безперервне електропостачання обладнання споживачів протягом тривалого часу у випадку збою в загальній електромережі. Використання джерел безперебійного живлення для систем критичного застосування ставить підвищені вимоги до енергоефективності, надійності їх функціонування та якості електроенергії у всіх режимах роботи.

Одним з найважливіших компонентів сучасних ДБЖ є система керування та моніторингу, яка відповідає за вимірювання електричних параметрів, дистанційний контроль стану, управління режимами роботи силових модулів та якісне забезпечення електроенергією в цілому. У передових країнах світу (США, ЄС) появилася нова стратегія розвитку електроенергетики, яка базується на концепції SmartGrid, що передбачає впровадження інтелектуальних цифрових засобів керування та зв'язку між її окремими компонентами та споживачами. На основі впровадження мікропроцесорних технологій все більшого поширення набувають комп'ютеризовані системи керування ДБЖ, що реалізують ефективні алгоритми управління і є обов'язковим елементом локальних енергетичних систем Microgrid, які призначені для розподіленої генерації електричної енергії та розглядаються в якості компонента мережі SmartGrid.

Найважливішими роботами в сфері вивчення та вдосконалення методів та засобів керування та моніторингу джерел безперебійного живлення є дослідження вітчизняних та зарубіжних вчених, серед яких варто відзначити наступних: Волочій Б.Ю., Мандзій Б.А., Кузнецов Д.С., Макаров В.О., Озірковський Л.Д., Расмуссен Н. (Rasmussen N.), Ферраро М. (Ferraro M.), Брунацціні Г. (Brunaccini G.), Саро Л. (Saro L.), Рахмат М.К. (Rahmat M.K.), Григораш О.В., Аббасова Т.С., Рогулина Л.Г. та інші.

Однак, незважаючи на велику кількість проведених наукових досліджень, огляд і аналіз існуючих підходів дає змогу стверджувати, що на сьогоднішній день не в повній мірі вирішено низку актуальних питань, які стосуються теоретичних аспектів і практичного впровадження високонадійних та енергоефективних компонентів комп'ютеризованих систем керування та моніторингу джерел безперебійного живлення. Зокрема, існує така суперечність: необхідність підвищення енергетичної ефективності ДБЖ з одного боку, та підвищення вимог до надійності з іншого.

Відомі підходи щодо підвищення надійності ДБЖ потребують певного компромісу з вимогами до його енергоефективності. Покращення обох цих параметрів є надзвичайно важливим для багатьох задач. В сучасних дослідженнях ДБЖ продовжуються роботи над створенням ефективних і простих методів підвищення надійності разом з забезпеченням високої енергоефективності функціонування джерел безперебійного живлення, які б мали достатню результативність. Хоча на сьогоднішній день вже з'явилося порівняно багато різних моделей промислових ДБЖ з сучасними комп'ютеризованими засобами моніторингу та керування, недостатньо опрацьованими залишаються аспекти, пов'язані з управлінням завантаженістю випрямляючих модулів в умовах невизначеності, стохастичних змін споживання електроенергії обладнанням, яке живиться від ДБЖ.

Тому науково-практична задача розроблення та дослідження моделей, методів та програмно-апаратних засобів для інтелектуальних систем керування та моніторингу джерел безперебійного живлення з метою підвищення їх надійності, енергоефективності і якості енергопостачання є актуальною та визначила напрямок наукового дослідження дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано в рамках держбюджетних та госпдоговірних науково-дослідних робіт Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, зокрема:

– ДІ 107-03 «Розробка та дослідження енергоекономних електронних пускорегулюючих апаратів та безелектродних високочастотних люмінесцентних ламп» (державний реєстраційний номер 0103U003522);

– ДФ 150-08 «Розробка та впровадження наземних технічних та програмних засобів системи моніторингу природних комплексів на основі дистанційного зондування Землі з космосу» (державний реєстраційний номер 0108U007121);

– г/д 465-18 «Удосконалення наземного комплексу спостереження за космічними об'єктами. Модернізація програмно технічних засобів КОС «Сажень-С»» (державний реєстраційний номер 0118U004720).

Роль автора у зазначених науково-дослідних роботах, у яких здобувач був виконавцем окремих етапів та завдань, полягає в створенні моделей, методів та програмно-апаратних засобів при розробці компонентів комп'ютеризованих систем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування систем безперебійного живлення шляхом розробки нових та удосконалення існуючих моделей, методів та програмно-апаратних засобів для покращення показників їх надійності та енергоефективності.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі потрібно вирішити наступні **задачі**:

1. Провести аналіз основних особливостей, тенденцій та перспектив розвитку методів та автоматизованих технічних засобів для керування та моніторингу систем безперебійного живлення, виявити їх переваги та недоліки, обґрунтувати вибір напрямку дослідження і формалізувати постановку наукової задачі.

2. Розробити імітаційну модель системи управління компонентами джерела безперебійного живлення, яка б враховувала зовнішні та внутрішні дестабілізуючі фактори на функціонування ДБЖ з метою дослідження їх впливу та покращення якості показників електропостачання.

3. Удосконалити метод адаптивного регулювання рівня завантаженості випрямляючих модулів джерела безперебійного живлення з можливістю зміни кількості навантажених випрямлячів в режимі реального часу з метою підвищення енергоефективності системи живлення.

4. Удосконалити метод керування випрямляючими модулями джерела безперебійного живлення шляхом адаптивного циклічного зміщення активних випрямлячів з метою підвищення надійності системи живлення.

5. Розробити метод керування компонентами джерел безперебійного живлення на основі використання нейромережевих технологій, який передбачає адаптивне ПД-регулювання процесу заряду акумуляторних батарей та короткострокове прогнозування споживання електроенергії.

6. Виконати практичне впровадження результатів дисертаційної роботи шляхом розробки на основі запропонованих моделей, методів та засобів апаратного, алгоритмічного та програмного забезпечення компонентів комп'ютеризованої системи керування та моніторингу джерел безперебійного живлення.

Об'єкт дослідження – процес функціонування компонентів систем безперебійного живлення для телекомунікаційних комплексів в умовах випадкової зміни навантаження.

Предмет дослідження – методи та програмно-апаратні засоби для підвищення ефективності процесу керування і моніторингу систем безперебійного електроживлення.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі для розв'язання поставлених задач використовувалися наступні методи досліджень: теорія автоматичного керування, теорія електричних кіл, теорія інформаційно-вимірювальної техніки, теорія нейронних мереж, теорія ймовірностей та математичної статистики, теорія надійності, методи цифрового опрацювання сигналів, методи імітаційного моделювання, теорія алгоритмів та програмування.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблено імітаційну модель системи управління компонентами джерела безперебійного живлення, яка, за рахунок врахування стохастичності зміни споживання електроенергії телекомунікаційним обладнанням, імітації зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів на функціонування ДБЖ, дала змогу дослідити їх вплив та покращити якість показників електропостачання.

2. Удосконалено метод адаптивного регулювання рівня завантаженості випрямляючих модулів джерела безперебійного живлення в межах наперед заданого оптимального діапазону значень, який відрізняється від відомих можливістю зміни кількості навантажених випрямлячів в режимі реального часу, що дало змогу знизити втрати від роботи випрямляючих модулів та підвищити таким чином енергоефективність ДБЖ.

3. Удосконалено метод керування випрямляючими модулями джерела безперебійного живлення шляхом адаптивного циклічного зміщення активних випрямлячів, що дало змогу підвищити показник надійності системи живлення, зокрема, середній час напрацювання на відмову, без зниження показників енергоефективності.

4. Вперше розроблено метод керування компонентами джерел безперебійного живлення на основі використання нейромережевих технологій, який відрізняється від існуючих застосуванням адаптивного ПД-регулювання процесу заряду акумуляторних батарей та короткострокового прогнозування споживання електроенергії, що дало змогу за рахунок ефективнішого управління покращити технічні характеристики системи безперебійного живлення при стохастичних змінах навантаження.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані практичні результати дисертаційного дослідження стали основою для технічної реалізації та впровадження у виробництво та у навчальний процес компонентів інтелектуальних високоефективних комп'ютеризованих систем для керування та моніторингу джерел безперебійного живлення з покращеними показниками надійності та енергоефективності. Практична цінність дисертаційної роботи полягає у наступному:

1. Розроблено компоненти інтелектуальної комп'ютеризованої системи керування та моніторингу джерел безперебійного живлення, застосування яких дало змогу підвищити коефіцієнт корисної дії ДБЖ на 3-4 %.

2. Розроблене на основі запропонованих методів апаратно-програмне забезпечення системи безперебійного живлення підвищує надійність роботи ДБЖ, зокрема, показник середнього напрацювання на відмову на 5-8 %.

Основні результати наукових теоретичних та експериментальних досліджень, отриманих здобувачем, були впроваджені і використовуються: у товаристві з обмеженою відповідальністю «ТД Інтеграл» (м. Тернопіль, акт впровадження від 12.11.2019 р.), у товаристві з обмеженою відповідальністю Тернопільське КБ радіозв'язку «Стріла» (м. Тернопіль, акт впровадження № 255 від 23.07.2020 р.), у товаристві з обмеженою відповідальністю «Техас-Т» (м. Тернопіль, акт впровадження від 10.09.2020 р.), у навчальному процесі кафедри комп'ютерних систем та мереж Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя при викладанні навчальних дисциплін «Комп'ютерна схемотехніка», «Основи інтернету речей», «Системне програмування» (м. Тернопіль, акт впровадження від 26.08.2020 р.). Впровадження результатів дослідження підтверджено відповідними актами, приведеними в додатку Б.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення та результати досліджень дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Роботи [3, 4, 16–21] опубліковані одноосібно. У друкованих працях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать основні теоретичні та практичні результати: [1, 10] – розроблення методу керування системою безперебійного живлення в локальній електроенергетичній мережі Microgrid; [2, 11] – реалізація апаратних засобів та програмного забезпечення для системи керування та моніторингу джерел безперебійного живлення; [5] – синтез ПД-контролера для регулятора в складі загальної моделі системи керування; [6] – формування структури автоматичної системи моніторингу та контролю параметрів; [7, 12] – формування структури та алгоритму роботи системи керування і моніторингу пристроїв гарантованого живлення; [8, 9] – розроблення структури інтелектуальної локальної розподіленої електромережі Microgrid та системи керування її компонентами; [13] – розроблення структурної схеми двох-процесорної інформаційно-вимірювальної системи керування пристроєм безперебійного електроживлення; [14] – реалізація апаратної частини комп'ютерної інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу пристроїв безперебійного електроживлення; [15] – розроблення методу підвищення енергоефективності джерел безперебійного живлення для телекомунікаційних систем; [22] – розроблення методу підвищення надійності компонентів модульної комп'ютеризованої системи безперебійного живлення; [23] – формування структури і алгоритму роботи системи керування з використанням нейромережевих технологій; [24] – розроблення імітаційної моделі для регулювання ПД-коефіцієнтів в складі загальної моделі системи управління.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися та обговорювалися на наступних науково-технічних конференціях: II та V міжнародних науково-технічних конференціях "Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми й перспективи" (м. Тернопіль, 2005 р. та 2015 р.); 8th, 9th and 10th International Symposiums "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering" (м. Пярну, Естонія, 2010 р. та 2011 р.); міжнародних науково-технічних конференціях "Фундаментальні та прикладні проблеми

сучасних технологій" (м. Тернопіль, 2010 р. та 2020 р.); The 51st International Scientific Conference "Power and Electrical Engineering" (м. Рига, Латвія, 2010 р.); 7th IEEE International Conference-Workshop "Compatibility and Power Electronics" (м. Таллінн, Естонія, 2011 р.); II та III міжнародних науково-технічних конференціях молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій" (м. Тернопіль, 2013 р. та 2014 р.); XIX науковій конференції ТНТУ ім. І.Пулюя (м. Тернопіль, 2016 р.); 9th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (м. Бухарест, Румунія, 2017 р.); International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (м. Відень, Австрія, 2017 р.); IV міжнародній науково-технічній конференції "Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій" (м. Тернопіль, 2019 р.); VII науково-технічній конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя "Інформаційні моделі, системи та технології" (м. Тернопіль, 2019 р.); міжнародній науково-практичній конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти "Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки" (м. Рівне, 2020 р.); IX міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Молодь у світі сучасних технологій за тематикою: використання інформаційних та комунікаційних технологій в сучасному цифровому суспільстві" (м. Херсон, 2020 р.); II International Scientific and Practical Conference Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA-2020) (м. Харків, 2020 р.); міжнародній науковій конференції «Іван Пулюй: життя в ім'я науки та України» (м. Тернопіль, 2020 р.). Результати дисертаційного дослідження обговорювались на семінарі кафедри інформатики факультету машинобудування та інформатики Університету в Бельсько-Бялій (Польща, 2015 р.), науково-тематичному семінарі № 9 «Інформаційні системи, обчислювальна техніка та автоматизація» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 12 січня 2021 р.).

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів наукового дослідження наведені у Додатку А.

Публікації. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 24 наукові праці, серед яких 6 статей у фахових науково-технічних виданнях (з них 2 статті – одноосібні), з яких 2 статті у закордонних наукових періодичних виданнях, 3 публікації проіндексовані міжнародною наукометричною базою Scopus, 3 статті проіндексовані міжнародною наукометричною базою Web of Science, 6 статей у матеріалах закордонних англomовних видань міжнародних наукових конференцій, та 13 публікацій у матеріалах міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації на двох мовах, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 200 сторінок, з яких 137 сторінок основного тексту. Робота містить 53 рисунки, 5 таблиць, список використаних джерел із 145 найменувань на 17 сторінках, 3 додатки на 27 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД І АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПОБУДОВИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ДЖЕРЕЛ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ

В даному розділі приведено результати аналітичного огляду та аналізу літературних джерел, в яких висвітлено проблеми керування та контролю стану промислових джерел безперебійного живлення. Здійснено огляд відомих методів та засобів підвищення ефективності роботи джерел безперебійного електроживлення. Визначено, що перспективним напрямком розвитку комп'ютеризованих систем керування та моніторингу ДБЖ є удосконалення існуючих та розробка нових методів підвищення показників надійності, енергоефективності та якості ДБЖ на основі синтезу моделей та високоефективних алгоритмів для покращення їх технічних характеристик.

1.1 Інтелектуальні електричні мережі

1.1.1 Smart Grid

Сучасний етап технологічного розвитку суспільства неможливий без використання електроенергії. Її застосовують у всіх сферах людської життєдіяльності: у промисловості, у побуті, в транспорті, у зв'язку, тощо. З кожним роком рівень споживання електричної енергії постійно зростає, використовуючи для її генерації все більше ресурсів [25]. В Україні, як і в багатьох країнах світу, набуває все більшої актуальності проблема якісного електропостачання споживачів. Це поняття включає в себе якість електроенергії, рівень надійності (безперебійності) електропостачання, а також якість послуг з її транспортування та розподілу.

Для підвищення ефективності функціонування енергосистем багатьох країн одним з найперспективніших напрямків є впровадження технології інтелектуальних електричних мереж – Smart Grid, яка дає змогу перерозподіляти електроенергію і оптимізувати енерговитрати. На сьогоднішній день в Європейському союзі та США на державному рівні прийняті стратегічні документи для впровадження та розвитку технології Smart Grid [26]. В 2017 році в Україні прийнято Енергетичну стратегію [27], у якій питанню впровадження інтелектуальних електромереж Smart Grid приділено велику увагу.

Суть технології Smart Grid [8, 28, 29] полягає в об'єднанні в єдину автоматизовану систему на технологічному рівні електромереж, виробників та споживачів електроенергії, що дає змогу відстежувати і контролювати всі режими роботи в реальному часі [30]. Залежно від зміни характеру споживання Smart Grid може здійснювати автоматичне регулювання подачі електроенергії. Реалізація концепції Smart Grid націлена на досягнення якісно нового рівня ефективності функціонування електромереж, підвищення пропускну здатності та системної надійності. Її впровадження забезпечить споживачам підвищення якості електроенергії та покращення показників надійності електропостачання, дасть змогу керувати енергоспоживанням, завдяки чому знизиться оплата за використані енергоресурси [31].

В Smart Grid здійснюється двостороння передача енергії та інформаційного потоку даних між споживачами і енергетичними об'єктами завдяки використанню сучасних засобів та технологій. Це стає можливим завдяки здатності споживачів отримувати електроенергію від локальних, в тому числі, відновлювальних джерел енергії або накопичувачів після її акумуляування [32].

Велика кількість зарубіжних вчених опублікували роботи, присвячені розробці та впровадженню технології Smart Grid, в яких розглянуті питання моделювання [33], проектування [34], керування навантаженням [35] і розвитку інтелектуальних електричних мереж [36].

1.1.2 Microgrid

Одним з найперспективніших напрямків розвитку Smart Grid є відносно нова концепція Microgrid. Локальні енергетичні системи Microgrid з поновлюваними джерелами електроенергії, як елемент енергосистеми інтелектуальних електричних мереж Smart Grid, дозволяють організувати весь цикл генерування, споживання та зберігання електроенергії [37].

Microgrid – це концепція малої розподіленої енергетики, яка передбачає перехід від централізованої системи до використання різноманітних типів джерел енергії, найбільш придатних до даних природних умов і особливостей конкретних споживачів [38, 39].

Система Microgrid включає в себе такі компоненти: джерела розподіленої генерації, накопичувачі енергії і локальних споживачів [8]. Microgrid може функціонувати в двох основних режимах роботи: автономний режим та режим з підключенням до зовнішньої електромережі. В автономному режимі навантаження живиться лише від локальних джерел Microgrid – сумарної електроенергії від резервних накопичувачів та розподілених джерел, якої достатньо для забезпечення процесу електроживлення навантаження. У випадку відсутності достатньої кількості енергії від резервних та альтернативних джерел, система Microgrid під'єднується до зовнішньої електромережі для відбору енергії до необхідного рівня для навантаження [40].

Будучи автономними або підключеними до загальної енергетичної мережі, об'єкти розподіленої генерації розташовані в безпосередній близькості від споживачів (невеликих міст, сіл, заводів) і виробляють електроенергію «на місці», істотно знижуючи втрати при передачі по лініях і підвищуючи, таким чином, коефіцієнт корисної дії.

Підвищення надійності електропостачання в Microgrid забезпечується завдяки оперативному переключенню споживачів між локальними джерелами енергії і загальною електромережею у випадку стрибків напруги чи перевантажень. До переваг технології Microgrid можна віднести можливість швидкої адаптації до особливостей використання електроенергії конкретними споживачами на відміну від централізованих систем електропостачання [41].

Обсяг електричної енергії, виробленої об'єктами розподіленої генерації, безпосередньо залежить від попиту локальних споживачів, які, в свою чергу, мають можливість коригувати поставки енергії відповідно до своїх потреб, що веде до підвищення їх ролі в управлінні енергосистемою.

Варто відзначити, що споживача в системі Microgrid можна охарактеризувати як «активний користувач», тобто активний учасник процесу регулювання навантаження, якому надано можливість самостійно змінювати обсяг отриманої електричної енергії на підставі балансу, своїх потреб і можливостей енергосистеми, використовуючи інформацію про ціни та обсяги поставок електроенергії, надійність, якість та ін. [8, 38].

Система керування (СК) перетворювачами в Microgrid – це інформаційно-інтелектуальна система, що інтегрує дані, які надходять з різних компонентів Microgrid, таких як: джерела живлення, накопичувачі електроенергії, навантаження і характеризується різними типами фізичних даних. Така система створюється для контролю енергоресурсів з урахуванням побажань користувача [42].

Одним з основних елементів Microgrid є система енергоменеджменту. Її завдання полягає не тільки в розумному розподілі енергії відповідно до визначених пріоритетів, а й у прогнозуванні. Знаючи інформацію про рівень сонячної активності і інтенсивність вітрового потоку, яка отримана протягом багатьох років спостережень, можна спрогнозувати, що в майбутньому, в той же день або місяць будуть аналогічні показники. Тим самим можна передбачити, яка кількість енергії буде вироблена на наступний день і яку групу джерел генерації електроенергії можна використовувати в поточний день. Ці передумови покладені в основу розробки програми енергоменеджменту з урахуванням прогнозу погоди [37].

Актуальним науковим завданням для розвитку Microgrid систем є: розробка та аналіз структур, алгоритмів і законів керування, інтегрованих пристроїв-регуляторів потоків електричної енергії, направлених на можливість функціонування системи Microgrid як в режимі роботи із зовнішньою електромережею, так і в автономному режимі [28].

1.1.3 Накопичувачі електроенергії

Однією з найбільших проблем при впровадженні систем Microgrid є нерегулярність генерації енергії відновлювальними джерелами, такими як енергія вітру чи сонця, оскільки вони залежать від погодних умов. Для вирішення цієї проблеми застосовуються накопичувачі електроенергії, які використовують для керування попитом на електроспоживання [43]. Тому розвиток технологій накопичення енергії, які дозволяють суттєво підвищити показники надійності та енергоефективності таких систем, є одним із ключових напрямків розвитку систем SmartGrid та Microgrid [44, 45].

Накопичувачі електричної енергії являють собою пристрої для акумуляції електроенергії для цілей її подальшого використання в необхідних інтервалах часу і режимах споживання. Пристрої для накопичення енергії заряджаються у випадку наявності надлишкової потужності, яка виробляється генераторами системи Microgrid, забезпечуючи необхідний енергетичний баланс в системі у випадку недостатньої генерації електроенергії [46].

Існує велика кількість типів накопичувачів електроенергії [43], які можуть використовуватись в системі Microgrid. Одним з основних методів накопичення електроенергії є електрохімічний метод, що базується на використанні акумуляторних батарей. На сьогоднішній день цей метод є найдешевшим, враховуючи витрати на експлуатацію і загальну вартість, що дає суттєву перевагу при його використанні. Впровадження нових матеріалів і розвиток сучасних технологій призводять до поступового удосконалення накопичувачів електроенергії. Це дозволяє зменшити масогабаритні характеристики, сприяє збільшенню ємності, скороченню тривалості заряду, зниженню експлуатаційних витрат, та ін., що істотно розширює можливості їх використання в промислових масштабах [45]. Для оптимального керування режимами роботи накопичувачів електроенергії в локальних енергетичних системах Microgrid [47] використовують джерела безперебійного живлення [48].

1.2 Класифікація і принципи функціонування джерел безперебійного електроживлення

Джерело безперебійного живлення (Uninterruptible Power Supply) – це комплекс обладнання для виробництва та накопичення електричної енергії, який призначений для забезпечення процесу електроживлення навантаження споживачів з необхідним рівнем якості від незалежних джерел, які забезпечують безперебійність електропостачання при переключенні від одного джерела електроенергії на інше [49, 50]. Особливу актуальність промислові ДБЖ отримали в сфері забезпечення процесу електропостачання для устаткування засобів зв'язку, телекомунікацій, центрів обробки даних де необхідний високий рівень надійності і якості електроенергії [51].

В результаті проведеного аналізу наукових праць [50, 52–60], в яких описані принципи функціонування та будова джерел безперебійного електроживлення було встановлено, що відповідно до стандарту ІЕС 62040-3 [61] за принципом дії ДБЖ можуть бути трьох типів [51, 52, 54, 62–68]: off-line, line-interactive та on-line. В ДБЖ on-line типу, на відміну від інших, процес живлення навантаження відбувається постійно, тому вони характеризуються нульовим часом переключення. Крім функцій резервування електричної енергії ДБЖ використовуються для фільтрації завад і забезпечення необхідного рівня якості електроенергії при відхиленнях параметрів електромережі від норми [51].

Поряд з ДБЖ, які забезпечують живлення споживачів напругою змінного струму існують електроживильні установки (ЕЖУ) – ДБЖ постійного струму, призначені для електропостачання засобів зв'язку і телекомунікацій [69]. Історично такі пристрої були створені на базі систем живлення постійного струму, які забезпечували автотрансформаторні станції постійною напругою 24 В, 48 В або 60 В з можливістю роботи в автономному режимі впродовж 4-8 годин [51]. Сучасні ЕЖУ забезпечують живлення обладнання вихідною напругою 24 В, 48 В, 54 В, 60 В, 110 В постійного струму і розраховані на потужність до декількох десятків кВт. ДБЖ постійного струму проектується за модульним принципом і включає наступні компоненти: випрямляючі модулі,

пристрій керування і контролю, акумуляторні батареї, обладнання для захисту та розподілу енергії, перетворювачі напруги постійного струму [51]. За необхідності, для забезпечення резервування живлення споживачів змінного струму, система комплектується інверторами [70].

В порівнянні з традиційними «моноблочними» системами модульні ДБЖ мають ряд суттєвих переваг: модульне джерело дозволяє побудувати систему безперебійного живлення з різними рівнями резервування, організувати масштабування ДБЖ як за часом автономної роботи, так і за потужністю. Модульна конструкція і заміна модулів користувачем в «гарячому» режимі дає можливість здійснювати профілактичне обслуговування ДБЖ без переривання якісного електроживлення навантаження, що збільшує ремонтпридатність ДБЖ і мінімізує простої обладнання у випадку виникнення аварії [71].

Створення ДБЖ з використанням модульного принципу скорочує час розробки системи, спрощує задачу по зміні її структури в залежності від вимог споживачів. Значний економічний ефект досягається при експлуатації таких систем за рахунок скорочення часу на технічне обслуговування і на усунення несправності в аварійних ситуаціях [72].

Серед розглянутих типів ДБЖ потрібно виділити так звані енергетичні масиви (Power Array). Це порівняно новий тип пристроїв, які представлені на ринку починаючи з середини 90-х років минулого століття. Енергетичний масив (ЕМ) – це джерело безперебійного живлення, яке містить паралельну систему силових модулів в одному корпусі, які характеризуються певною надлишковістю ($N + M$) та можливістю «гарячої» заміни. ЕМ має здатність продовжувати роботу при виході з ладу одного, або кількох силових модулів (перетворювачів електроенергії), акумуляторних батарей або модуля керування [51, 73, 74].

На сьогоднішній день при виготовленні ДБЖ для використання в системі Microgrid активно використовується модульна конструкція. Основними перевагами модульних ДБЖ є вища надійність та масштабованість. Через те, що модульні ДБЖ постійного струму отримали найбільше поширення для живлення телекомунікаційного обладнання, удосконалення системи керування та моніторингу пристроїв саме такого типу розглядається в дисертаційній роботі.

1.3 Огляд відомих методів та засобів підвищення ефективності керування джерелами безперебійного електроживлення

1.3.1 Критерії ефективності та вимоги до джерел безперебійного живлення

Питання управління режимами роботи ДБЖ досить добре вивчені в теоретичному і прикладному аспектах. Їх огляд показує, що на сьогоднішній день до ДБЖ пред'являються наступні основні вимоги [75]:

1. Висока надійність і безперервність процесу електропостачання, тобто здатність системи забезпечувати споживачів електроенергією необхідної якості в заданих умовах експлуатації протягом певного часу. Безперебійність електропостачання – це процес забезпечення споживачів електроенергією, при якому, у випадку виникнення аварійних ситуацій, в системі не припиняється електропостачання споживачів або відсутня перерва на час включення резервного джерела живлення.

2. Висока якість електроенергії, яка характеризується стабільністю електричних параметрів, тривалістю і характером перехідних процесів.

3. Високі показники енергоефективності, які, як правило, оцінюються значенням коефіцієнту корисної дії (ККД), який визначає ефективність перетворення енергії в ДБЖ.

4. Максимальна автоматизація (відсутність необхідності в обслуговуванні або з мінімальним обслуговуванням) і великий термін служби.

5. Мінімальні габарити і маса при забезпеченні максимальної потужності.

6. Низька вартість, тобто витрати на виготовлення і експлуатацію ДБЖ протягом певного часу роботи при заданих показниках надійності повинні бути мінімальними.

В рамках даної дисертаційної роботи розглядається задача покращення показників енергоефективності та надійності роботи ДБЖ разом з забезпеченням високих показників якості електроенергії. Для ефективного вирішення цієї задачі необхідно розглянути та проаналізувати існуючі методи, які застосовуються для забезпечення заданого рівня надійності та енергоефективності.

1.3.2 Аналіз підходів та методів підвищення показників надійності систем безперебійного живлення

Сучасні телекомунікаційні комплекси та центри обробки даних потребують підвищеної надійності засобів електроживлення. За деякими оцінками [76] простій невеликого сайту, який працює в сфері електронної комерції, може спричинити непоправні збитки у розмірі до восьми тисяч доларів за годину. Для великих on-line компаній такі втрати можуть перевищувати 180 тис. доларів за годину (див. табл. 1.1) [77].

Таблиця 1.1 – Приблизні втрати підприємств, які можуть бути спричинені простоєм у роботі, внаслідок припинення електропостачання тривалістю 1 год.

Вид діяльності	Вартість години простою
Обслуговування банкоматів	\$ 14 000
Надання послуг з бронювання готелів	\$ 41 000
Сервіси з продажу та резервування авіаквитків	\$ 89 000
Інтернет-магазин Amazon.com	\$ 180 000
Інтернет-аукціон Ebay.com	\$ 225 000
Авторизація банківських кредитних карт	\$ 2 600 000
Обслуговування біржових транзакцій	\$ 6 450 000

Сучасні ДБЖ повинні відповідати високим стандартам надійності, щоб забезпечувати потреби ринку. Надійність є одним з найважливіших критеріїв оцінки техніко-економічної ефективності ДБЖ. Велику кількість наукових праць за останні роки присвячено підходам, методам та засобам, які призначені для підвищення надійності функціонування систем безперебійного живлення.

Основними кількісними характеристиками надійності ДБЖ є: ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов, середній час напрацювання на відмову (тривалість безвідмовної роботи), коефіцієнт готовності, середній час відновлення [74, 75, 78, 79].

Важливим показником надійності ДБЖ є рівень безперебійності електропостачання споживачів, який оцінюється коефіцієнтом готовності K_{Γ} – відносним значенням загальної тривалості нормальної роботи джерела безперебійного живлення впродовж визначеного інтервалу часу [74].

З огляду на необхідність резервування основних функціональних вузлів вважають, що час відновлення їх працездатності дорівнює часу ввімкнення резервних модулів. Тому значення коефіцієнта готовності функціональних вузлів ДБЖ визначається за формулою [75]:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{\text{СЧНВ}}}{T_{\text{СЧНВ}} + T_{\text{В}}} \cdot P_{\text{БР}}(t),$$

де $T_{\text{СЧНВ}}$ – середній час напрацювання на відмову функціональних вузлів (тривалість безвідмовної роботи), $T_{\text{В}}$ – середній час відновлення (час ввімкнення резервного функціонального вузла), $P_{\text{БР}}(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи функціональних вузлів за визначений інтервал часу [75].

В статті [80] запропонована напівмарківська модель для оцінки коефіцієнта готовності і середнього часу напрацювання на відмову ДБЖ для центрів обробки даних. Отримані аналітичні вирази для розрахунку цих параметрів. Приведено співвідношення для розрахунку необхідної ємності акумуляторної батареї ДБЖ на основі заданого коефіцієнта готовності.

Середній час напрацювання на відмову визначається за формулою [75]:

$$T_{\text{СЧНВ}} = \frac{1}{\lambda_{\text{С}}(t)},$$

де $\lambda_{\text{С}}(t)$ – сумарне значення інтенсивності відмов функціональних вузлів ДБЖ за час t .

Мінімальна величина показників надійності регламентується міжнародними, державними і галузевими стандартами, де значення середнього часу відновлення T_B повинно становити не більше 30 хвилин [79]. Забезпечення надійного функціонування ДБЖ досягається різними схмотехнічними та архітектурними рішеннями (наприклад, використанням різних схем резервування) і застосуванням спеціалізованого обладнання.

Існує велика кількість методів для підвищення показників надійності електроенергетичних систем. У дослідженні [79] приведені результати аналізу надійності чотирьох типів систем електроживлення для телекомунікаційного обладнання на базі ДБЖ з використанням логіко-ймовірнісного методу. Авторами показано, що система безперебійного живлення з вихідною напругою постійного струму забезпечує найвищий коефіцієнт безвідмовності порівняно з іншими типами.

В статті [81] розглянуті методи, які дозволяють підвищити коефіцієнт готовності ДБЖ шляхом збільшення $T_{СЧНВ}$ і зменшення T_B . Зокрема, пропонується:

- використовувати ДБЖ з резервуванням основних модулів з можливістю їх заміни в «гарячому» режимі;
- впровадити передову технологію керування акумуляторними батареями (Advanced Battery Management), що дозволяє збільшити тривалість їх життєвого циклу;
- застосовувати технології визначення передвідмовного стану за рахунок прогнозування відмов;
- використовувати системи дистанційного моніторингу ДБЖ в цілому та його окремих функціональних вузлів;
- впровадити систему автоматичного регулювання напруги, яка дає змогу корегувати вхідну напругу, не переходячи на живлення від АБ.

Проте, автори цієї статті розглядали в своїй роботі лише ДБЖ з вихідною напругою змінного струму, які мають нижчий ККД.

У роботах Б. Ю. Волочія, Д. С. Кузнєцова, Л. Д. Озірковського, Б. А. Мандзія розглянуті питання надійнісного проектування джерел безперебійного електроживлення [82–90]. Одним із найбільш ефективних методів для підвищення показників надійності ДБЖ є забезпечення надлишковості її елементів або системи в цілому. Недоліком цього методу є те, що він спричиняє зниження коефіцієнту корисної дії системи.

В роботі [82] розроблена надійнісна модель для автоматизації процесу проектування відмовостійкої системи для ДБЖ цілодобової експлуатації. Враховано ненадійність контролю, діагностики та комутуючих елементів. Досліджено залежність тривалості безвідмовної роботи від кількості модулів.

В науковому дослідженні [83] запропоновані Марковські моделі відмовостійких ДБЖ для визначення умов переходу від стратегії оперативного відновлення до стратегії планового відновлення ДБЖ при забезпеченні необхідних значень показників надійності.

В статті [84] запропоновано надійнісні моделі відмовостійких систем для ДБЖ з різними конфігураціями, які дозволяють оптимізувати конфігурацію ДБЖ за критерієм найвищих значень показників надійності за найменших затрат або вибрати найкращий варіант із множини заданих.

В роботі [85] здійснено порівняння методів профілактичного та аварійного відновлення ДБЖ. Показано, що стратегія аварійного відновлення дозволяє досягти виконання умови досягнення значення ймовірності безвідмовної роботи ДБЖ $P_{БР} \geq 0,99$ на довшому інтервалі експлуатації. Однак, при цьому не було взято до уваги фактор зниження ККД внаслідок застосування цього методу.

Використовуючи розроблені в [86] надійнісні моделі відмовостійких систем ДБЖ можна визначити, зміна якого з параметрів системи призведе до найбільшого покращення значення показників її надійності. Проте, ці моделі не враховують можливість зміни конфігурації ДБЖ в процесі її функціонування.

В роботі [87] для підвищення надійності пропонується замість несправних модулів ДБЖ, які вийшли з ладу підключати модулі ковзного резерву за час,

середнє значення якого становить $T_{ПРМ}$, проте методів для зменшення цього часу запропоновано не було.

В статті [88] розглянуті питання надійнісного проектування відмовостійких систем з комбінованим структурним резервуванням для ДБЖ. Розроблені надійнісні моделі, які дають можливість знайти значення параметрів конфігурації відмовостійкого ДБЖ при заданих значеннях показників надійності.

В роботі [89], використовуючи розроблені надійнісні моделі, було здійснене порівняння двох конфігурацій ДБЖ з навантаженим і ненавантаженим резервуванням модулів. В результаті порівняння було визначено, що кращі показники надійності має відмовостійка система ДБЖ з навантаженим резервуванням модулів. Це пояснюється обмеженими можливостями засобів діагностики та контролю і впливом ненадійних перемикачів. Недолік цього підходу полягає в тому, що навантажене резервування призводить до зменшення коефіцієнта завантаженості i , як наслідок, до зниження ККД системи.

В статті [90] досліджено залежність показників надійності від періодичності профілактичного технічного обслуговування ДБЖ двох конфігурацій $(N+M)$ та $2x(N+M)$. Розроблені моделі відмовостійких систем для ДБЖ у вигляді графа станів та переходів, які дозволяють здійснювати оптимізацію конфігурації ДБЖ при забезпеченні заданої надійності.

У роботі [91] показано, що висока відмовостійкість ДБЖ досягається завдяки наявності $(N+1)$, $(N+2)$, ..., $(N+M)$ модулів. У випадку відмови будь-якого з них навантаження перерозподіляється між іншими модулями. «Гаряче» резервування забезпечує нульовий час простою, оскільки для заміни модуля, який вийшов з ладу, не має необхідності відключати весь пристрій, тому що модулі, які залишились в роботі, можуть забезпечити повноцінне функціонування системи. Проте, в роботі не аналізується вплив на енергоефективність системи.

Результати досліджень, проведених в статтях [92–96] показали, що модульні ДБЖ, як змінного так і постійного струму, мають вищі показники надійності ніж монолітні ДБЖ. В свою чергу система ДБЖ постійного струму забезпечує вищі показники надійності, зокрема коефіцієнт готовності, ніж ДБЖ змінного струму [97], що пояснюється наявністю в останніх більшої кількості компонентів і підсистем. З врахуванням цих факторів, в дисертаційній роботі пропонується використати модульні ДБЖ постійного струму.

В роботі [98] був розроблений алгоритм автоматизованого проектування ДБЖ постійного і змінного струму на базі методу морфологічного синтезу, використання якого дало змогу підвищити значення важливого показника надійності ДБЖ – середнього часу напрацювання на відмову. Однак, в цій роботі не висвітлені питання впливу стохастичної зміни навантаження на надійність ДБЖ.

Автори роботи [99] пропонують модель у вигляді графа станів та переходів, яка дозволяє адекватно враховувати надійнісну поведінку програмно-апаратної системи у випадку збоїв і відмов як апаратних засобів так і програмного забезпечення.

В статті [100] здійснено порівняння моноблочних і модульних ДБЖ, розглянуті переваги та недоліки кожного з цих варіантів конфігурацій з точки зору надійності, зручності та відмовостійкості. Проте, аспект енергоефективності не був врахований.

Аналіз надійності розподілених систем управління ДБЖ двох типів наведений в роботі [101]. В ньому автори порівнюють показники надійності ДБЖ з однопроцесорною платою керування та ДБЖ на основі багатопроцесорних плат керування застосовуючи Марковські моделі. Крім того, запропонована модель зміни частоти відмов в залежності від зміни умов навколишнього середовища. В результаті порівняння виявлено, що багатопроцесорна система керування забезпечує кращі показники надійності роботи ДБЖ.

У статті [102] пропонується метод проектування цифрових резонансних контролерів для ДБЖ надійної структури з дискретним часом. Розглянуто методи дискретизації Ейлера і Адамса-Башфорта, які описують невизначену систему без зворотного зв'язку. Періодичне відстеження еталона / відхилення завад гарантується введенням резонансного контролера з дискретним часом в контур керування. Параметри контролера визначаються вирішенням задачі опуклої оптимізації з врахуванням обмежень лінійних матричних нерівностей.

В роботах [66, 103] запропонований метод побудови надійнісних блок-схем для оцінки параметрів надійності п'яти типів ДБЖ та п'яти різних конфігурацій систем на основі ДБЖ. Основною перевагою цього методу є його простота в побудові моделі надійності, яка може відобразити взаємозалежності компонентів в системі. Було визначено, що online ДБЖ з лінією байпас володіє найкращим значенням коефіцієнта готовності.

В статті [104] представлений метод оцінки показників надійності ДБЖ з використанням моделювання методом Монте-Карло. Результати моделювання показали, що для підвищення надійності системи ДБЖ необхідно використовувати обхідну лінію з іншого джерела, а не з основної мережі живлення.

В результаті приведеного вище огляду можна прийти до висновку, що основними показниками надійності джерела безперебійного живлення є коефіцієнт готовності, ймовірність безвідмовної роботи на деякому визначеному відрізку часу, а також середній час напрацювання на відмову (тривалість безвідмовної роботи). Показники надійності всієї системи розраховуються на основі показників кожного компонента та їх взаємозв'язків.

Проведений аналіз методів забезпечення надійності роботи ДБЖ показав, що для отримання оптимальних показників надійності в сучасних ДБЖ використовують модульну конфігурацію з надлишковістю, яка б забезпечувала навантажене резервування та заміну модулів в «гарячому» режимі.

1.3.3 Методи підвищення енергетичних показників ДБЖ

Як правило, для оцінки енергетичних показників застосовують розрахункові значення ККД та критерії оцінки якості електроенергії. Коефіцієнт корисної дії ДБЖ – це характеристика ефективності джерела безперебійного живлення, яка визначається як відношення енергії, використаної на живлення корисного навантаження, до сумарної енергії, отриманої системою. З практичної точки зору важливим показником є значення ККД в основному режимі ДБЖ, тобто режимі, який має найбільший часовий інтервал експлуатації системи [75].

Значення ККД, яке застосовується в розрахунках при 100 % завантаженні ДБЖ, може привести до недооцінки втрат електричної енергії, оскільки в реальних системах, як правило, функціонування ДБЖ відбувається при неповному завантаженні [105]. Тому ККД ДБЖ потрібно розглядати як функцію від рівня його завантаженості [106].

Значення ККД, яке, зазвичай, приводиться в технічному описі до конкретної моделі ДБЖ, для різних значень коефіцієнта завантаженості розраховується експериментальним шляхом [69, 106, 107]. Коефіцієнт завантаженості K_3 ДБЖ розраховується співвідношенням номінальної потужності і кількості силових модулів, які працюють паралельно, для живлення спільного навантаження. Формула для визначення коефіцієнта завантаженості ДБЖ K_3 має вигляд [106]:

$$K_3 = \frac{P_{\text{сп}}}{N \cdot P_{\text{ном}}},$$

де $P_{\text{сп}}$ – розрахована повна потужність споживання електроенергії, N – кількість силових модулів, які живлять спільне навантаження паралельно, $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність кожного з силових модулів ДБЖ.

Використання ДБЖ постійного струму забезпечує підвищення ККД енергосистеми на 5-15 % порівняно з системою ДБЖ змінного струму [108]. В [109] запропонована стратегія керування ДБЖ для центру обробки даних, яка базується на використанні удосконаленого генетичного алгоритму, що дало змогу знизити експлуатаційні витрати системи завдяки прогнозуванню в режимі реального часу рівня навантаження та моніторингу вартості електроенергії. Розроблений інтелектуальний алгоритм заряду-розряду АБ, який не впливає на термін її служби.

В результаті порівняльного аналізу в роботах [110–112] встановлено, що найкращим співвідношенням показників надійності та енергоефективності володіють модульні ДБЖ з вихідною напругою постійного струму для живлення центрів обробки даних та телекомунікаційного обладнання.

В наукових працях [107, 113] відзначено, що для зменшення втрат і підвищення енергетичної ефективності потрібно скоротити надлишковість за рахунок використання адаптивної модульної архітектури ДБЖ, яка дозволить нарощувати інфраструктуру електроживлення по мірі росту навантаження.

Аналіз наукових публікацій [93, 112, 113] свідчить про те, що для сучасних джерел безперебійного живлення все більше зростають вимоги щодо забезпечення високого рівня надійності та відмовостійкості шляхом використання модульної архітектури і резервування.

В роботі [114] представлений метод розподіленого адаптивного керування модульними ДБЖ. В цьому методі використовується різниця між активною потужністю силового модуля і середньою активною потужністю всіх модулів ДБЖ. Таким чином підвищується енергоефективність системи, проте, в цьому дослідженні не врахований вплив запропонованого методу на показники надійності ДБЖ.

В роботі [115] представлений метод розподіленого середнього інтегрального вторинного керування для модульних ДБЖ, які використовуються в системі Microgrid. Пропонується використати технологію CAN для розподілу

вихідної напруги і частоти між модулями інверторів. Однак, даний метод не підходить для застосування в ДБЖ з вихідною напругою постійного струму, яка розглядається в даній роботі.

Проведений аналіз методів покращення енергетичних показників ДБЖ дає підстави вважати, що для підвищення ККД необхідно скорочувати надлишковість модулів резервування та підвищувати коефіцієнт їх завантаженості для того, щоб зменшити втрати холостого ходу в системі живлення. Виникає протиріччя, яке полягає в тому, що заходи, які сприяють покращенню показників надійності ДБЖ призводять до збільшення надлишковості силових модулів, а отже знижують його ККД.

Отже, в результаті огляду та аналізу наукових праць можна зробити висновок, що до сьогоднішнього дня продовжуються спроби розробки та впровадження ефективних і простих методів одночасного підвищення надійності та енергоефективності роботи систем керування для джерел безперебійного живлення, які б мали достатню результативність.

1.4 Огляд і критичний аналіз існуючих комп'ютеризованих систем для керування та моніторингу ДБЖ

Одним з найважливіших компонентів сучасних ДБЖ є система керування та моніторингу, яка відповідає за вимірювання електричних параметрів, опитування аварійних сигналів, керування режимами роботи пристрою, архівування та передачу даних в персональний комп'ютер для зберігання та подальшої обробки та ін. У зв'язку з інтенсивним розвитком мікропроцесорних технологій в даний час все більшого поширення набувають комп'ютеризовані системи керування ДБЖ, що дають змогу реалізовувати ефективніші алгоритми управління. Хоча на сьогоднішній день вже з'явилося порівняно багато різних моделей промислових ДБЖ з сучасними комп'ютеризованими засобами моніторингу та керування, питання створення нових ефективніших методів та

засобів керування системами безперебійного живлення, оптимізації їх програмно-алгоритмічних рішень вивчені не достатньо.

Питанням створення та удосконалення систем керування джерелами безперебійного живлення займається велика кількість фахівців. За кордоном розробкою та виготовленням ДБЖ займаються провідні компанії розвинених держав – США, Німеччини, Норвегії, Швеції та багатьох інших. Відомі зарубіжні підприємства General Electric, Eltek, Schneider Electric, Powercom, CyberPower, BENNING, AEG Power Solutions, Delta, Powernet, CE+T, Socomec, Eaton, Riello UPS, Makelsan, Luxeon та інші серійно виготовляють та масово впроваджують комп'ютеризовані системи для керування та моніторингу ДБЖ. В Україні виробниками таких систем є: Vektor Energy, LVT, Integral, Volter та інші.

Проведений аналіз функціональних можливостей комп'ютеризованих систем для управління та моніторингу ДБЖ показав, що присутні на світовому ринку системи мають схожий мінімальний функціонал. В результаті огляду літературних джерел виявлено, що в якості системи керування та моніторингу ДБЖ, як правило, використовується розподілена комп'ютеризована система (РКС). Вона являє собою апаратно-програмний комплекс (АПК), який призначений для контролю та реєстрації основних електричних параметрів джерел безперебійного живлення. РКС здійснює функції автоматизованого збору, збереження, обробки та передачі інформації про стан і режими роботи ДБЖ на єдиний сервер системи моніторингу в режимі реального часу, а також швидкий доступ до збережених даних.

Підвищення ефективності роботи системи керування ДБЖ в режимі реального часу може бути реалізовано за рахунок інтелектуалізації процесів керування, діагностики та контролю на основі використання широкого спектру алгоритмічних, програмних та апаратних методів і засобів. Поєднання сучасних апаратних засобів та перспективного алгоритмічного та програмного забезпечення дає змогу удосконалити існуючі системи керування та моніторингу ДБЖ з метою підвищення ефективності їх роботи.

PKC управління та контролю стану ДБЖ, як правило, включає в себе: блок збору та обробки даних, блок індикації, набір давачів (датчик струму, напруги, температури акумуляторних батарей, датчик диму, та ін.), модуль керування та моніторингу.

В роботі [45] розроблена цифрова система керування на основі ПЛІС Cyclone IV EP4CE22F17C6N для ДБЖ з літій-іонними батареями та активними фільтрами, яка призначена для використання у складі Smart Grid. Недоліком цієї системи є низька потужність, що не дає змоги застосувати її для живлення промислового обладнання телекомунікаційних комплексів.

Автори [116] представили систему гарантованого електропостачання для інфокомунікаційного обладнання з використанням відновлювальних і нетрадиційних джерел електроенергії. Відзначається, що для забезпечення надійності, електропостачання повинно здійснюватися від трьох незалежних джерел живлення, які взаємно резервуються. Однак, використання нетрадиційних джерел електроенергії суттєво ускладнює як апаратну так і програмну частину цієї системи, що призводить до зниження її надійності.

В роботі [117] розглядається система, яка призначена для контролю стану заряду акумуляторної батареї. Наведена структурна схема пристрою та алгоритми функціонування контролера. Проте, недоліком даної системи є відсутність важливих функціональних можливостей: накопичення статистичних даних про параметри акумуляторів в енергонезалежну пам'ять, виведення інформації на зовнішні пристрої.

В статті [118] розглядаються алгоритми роботи системи керування ДБЖ на базі мікроконтролера MC68HC908MR32. Описані режими роботи системи та особливості функціонування керуючого модуля. Недоліком цієї системи є відсутність можливості передачі даних моніторингу по Ethernet мережі, оскільки з наявних інтерфейсів є лише RS-232.

В роботі [119] представлено ДБЖ типу енергетичний масив Symmetra Power Array від компанії Schneider Electric. Завдяки модульній архітектурі ця система дозволяє резервувати не лише силові блоки, але і модулі керування та акумуляторні батареї. СК для цього ДБЖ має режим самодіагностики, завдяки якому автоматично визначається несправний модуль. Також присутня можливість дистанційного моніторингу стану компонентів системи. Проте, недоліком є те, що силові модулі розроблені на базі ШІМ-перетворювачів. Вони породжують імпульсні завади, до яких телекомунікаційне обладнання дуже є чутливим.

В статті [120] описано ДБЖ постійного струму, яке має модульну конструкцію, що дає можливість збільшувати потужність системи та здійснювати резервування і "гарячу" заміну випрямлячів у випадку виникнення несправності. Для управління використовується мікропроцесорний модуль, який дозволяє керувати режимами роботи ДБЖ та здійснювати моніторинг його стану по IP-мережі. Система має можливість керувати процесом заряду акумуляторної батареї в п'яти різних режимах та оцінювати її залишкову ємність для вчасної заміни АБ після відпрацювання свого ресурсу. Однак, в даній ДБЖ відсутня можливість керування процесом підключення / відключення випрямлячів для регулювання коефіцієнта їх завантаженості, який суттєво впливає на значення ККД системи.

В роботах [121–123] запропонований оригінальний алгоритм функціонування системи керування компонентами ДБЖ в чотирьох основних режимах роботи. Система розроблена на базі 16-розрядного мікроконтролера 80C196MD. Запропонований метод підбору оптимального значення потужності основних силових модулів для отримання максимального ККД. Обґрунтована доцільність застосування ДБЖ з вихідною напругою постійного струму для живлення споживачів різних типів, яке має надійнішу і простішу структуру силової частини. Показано, що робота системи в умовах низького навантаження призводить до зниження ефективності ДБЖ. Проте, реалізації методу

регулювання рівня завантаженості силових модулів в режимі реального часу запропоновано не було.

В статті [124] автори порівнюють дві конфігурації ДБЖ постійного струму з вихідними напругами 48 В та 380 В. В результаті порівняння зроблений висновок про те, що система 380 В ДБЖ володіє кращими показниками ефективності і нижчою вартістю, проте має гірші показники надійності порівняно з ДБЖ 48 В. Пропонується структура гібридного ДБЖ 48 В / 380 В, яка об'єднує сильні сторони обох систем.

В статті [56] описанні промислові ДБЖ з цифровою системою управління на базі сучасних DSP-мікроконтролерів, яка керує алгоритмами роботи всіх функціональних вузлів та здійснює моніторинг поточних параметрів ДБЖ. Недоліком цієї системи є відсутність модульної структури, що знижує надійність та підвищує складність та тривалість відновлення у випадку появи несправності.

В роботі [125] розглядаються ДБЖ компанії General Electric серії VH, які оснащені унікальною технологією інтелектуального керування акумуляторними батареями (Superior Battery Management). Ця технологія дозволяє збільшити термін служби АБ та підвищити їх експлуатаційні характеристики. Недоліком даної моделі є відсутність модульної конструкції, що знижує надійність ДБЖ.

В роботі [126] запропонована система керування online ДБЖ на базі мікроконтролера PIC 16F877A. Запропонований метод інтелектуального управління процесом заряду акумуляторних батарей.

В статті [127] змодельований і розроблений контролер системи електроживлення на базі штучного інтелекту з використанням апарату нечіткої логіки для інтелектуального керування ДБЖ в системі Microgrid. До недоліків можна віднести складність реалізації такої системи та її високу вартість.

В наукових працях [128, 129] описані системи керування on-line ДБЖ на базі цифрових сигнальних процесорів, в яких використовується метод прогнозного керування інвертором. Проте, для живлення телекомунікаційного обладнання ефективніше застосовувати випрямлячі замість інверторів, щоб уникнути подвійного перетворення енергії.

В статтях [130, 131] представлені інтелектуальні системи моніторингу та керування ДБЖ на базі технологій Internet of Things та хмарного сервісу CloudMQTT, які дають можливість дистанційно контролювати стан та параметри ДБЖ. До недоліків таких систем можна віднести відсутність можливості дистанційного оновлення програмного забезпечення мікроконтролерів.

В результаті огляду і критичного аналізу існуючих комп'ютеризованих систем для керування та моніторингу ДБЖ виявлено, що на даний момент ще не впроваджено рішення, яке б дозволило забезпечити одночасне підвищення показників надійності та енергоефективності ДБЖ, особливо при роботі в умовах стохастичної зміни навантаження.

1.5 Загальна концепція створення інтелектуальних систем керування джерелами безперебійного електроживлення

При створенні комп'ютеризованих систем для управління складними системами з'явилась тенденція розвитку в напрямку інтелектуалізації процесу керування. Ознакою інтелектуальних керуючих систем є застосування знань про об'єкт управління, а також використання способів прийняття рішень, які характерні людському мозку [132–137].

Використання потужних мікрокомп'ютерів і мікроконтролерів сучасної архітектури в керуючих та інформаційно-вимірювальних системах дає змогу реалізувати складніші програмні алгоритми, що може суттєво розширити їхні функціональні можливості, зокрема [135]:

- врахування не лише поточного стану процесу, а і його передісторії завдяки вбудованій пам'яті, створення і поповнення бази знань про об'єкт управління;
- зміна керуючих алгоритмів і параметрів системи програмним способом при появі нестандартних ситуацій, враховуючи зміну поведінки об'єкта контролю – адаптація в реальному часі до процесу прийняття рішень.

Наявність програмного забезпечення і процесора в комп'ютерній системі ще не вказує на наявність інтелекту. Він залежить від комплексного використання програмно-алгоритмічних і апаратних можливостей на основі поточної і апіорної інформації про мету і умови функціонування системи.

Появилась тенденція щодо впровадження інтелектуальних систем у різноманітні технічні комплекси, які характеризуються складними алгоритмами поведінки з аналізом великого об'єму даних. Процес керування в таких системах супроводжується жорсткими часовими обмеженнями при прийнятті рішень [132, 135]. Порівняльний аналіз інтелектуальної і традиційної систем безперебійного живлення приведений в табл. 1.2 [138].

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз інтелектуальної і традиційної систем безперебійного живлення

№	Характеристика	Традиційна	Інтелектуальна
1	Організація обслуговування	Діагностування та планові ремонти	Віддалений моніторинг та ремонти за станом
2	Організація диспетчерського керування	Системоорієнтоване, автоматизоване та ручне	Клієнтоорієнтоване, в реальному часі
3	Надійність	Локальні системи захисту та автоматики, відновлення у ручному режимі	Адаптивні розподілені системи захисту, самовідновлення та секціонування
4	Інформаційно-вимірювальні системи та комунікації	Локальні давачі та лічильники, однонаправлені потоки інформації від споживача	Розподілені, інтелектуальні, двонаправлені потоки інформації
5	Оцінка ситуації	За фактом	Прогнозування та попередження виникнення

Інтелектуальні системи керування і оброблення інформації найчастіше пов'язують з використанням штучних нейронних мереж (ШНМ) – впорядкованих структур на основі нейронів, які можуть виконувати нелінійні складні перетворення. ШНМ здатна накопичувати досвід поведінки об'єкта

управління і правильних керуючих дій з метою прогнозування. Застосування цих можливостей потребує нових підходів до проектування інформаційно-вимірjuвальних систем.

Дослідженнями в сфері короткострокового прогнозування споживання електроенергії з використанням нейромережових технологій займались провідні фахівці. Зокрема, в роботі [139] запропонований метод короткострокового прогнозування електроспоживання на базі використання ШНМ. Його застосування дозволяє підвищити точність планування оптимального режиму роботи енергосистеми, що забезпечує підвищення ефективності та надійності процесу електропостачання.

В статті [140] наведені методи та способи, які дають можливість здійснювати автоматичне керування процесом автономного електропостачання в умовах невизначеності. Запропоновано використати математичний апарат нечіткої логіки з нейромережевою адаптацією для прогнозування та узгодження процесів електропостачання та енергоспоживання автономних споживачів.

Автори наукового дослідження [141] запропонували використати рекурентну нейронну мережу для короткострокового прогнозування обсягу споживання електроенергії в Україні.

Задача проектування інтелектуальних комп'ютеризованих систем полягає у визначенні необхідної структури ШНМ, методів її навчання для виконання розумової діяльності в процесі управління об'єктом. Після цього можна створювати АПК, який буде виконувати управління системою безперебійного живлення за принципами інтелектуальності.

Впровадження принципів інтелектуальності потребує застосування нових підходів до процесу проектування комп'ютеризованих систем керування та моніторингу джерел безперебійного живлення.

1.6 Формулювання напрямку та постановка задач дисертаційного дослідження

Розвиток нових технологій в енергетиці, таких як SmartGrid та Microgrid, ставить задачу подальшого удосконалення ДБЖ в напрямку підвищення стабільності та надійності електроживлення критичних об'єктів. З іншого боку ставиться задача суттєвого підвищення продуктивності роботи системи за рахунок підвищення ККД ДБЖ для зниження рівня споживання електроенергії та на зменшення витрат на її оплату.

Не дивлячись на велику кількість проведених досліджень, огляд і аналіз існуючих підходів дає змогу стверджувати, що на сьогоднішній день не в повній мірі вирішено ряд актуальних питань, які стосуються важливих теоретичних аспектів та технічної реалізації енергоефективних компонентів комп'ютеризованих систем для керування та моніторингу джерел безперебійного живлення, які володіють підвищеними показниками надійності та енергоефективності.

Отже, на сьогоднішній день існує така суперечність: необхідність підвищення енергетичної ефективності ДБЖ з одного боку, та підвищення вимог до показників надійності з іншого боку. Подолати це протиріччя можна шляхом вирішення актуального науково-практичного завдання розроблення методів та засобів для створення високонадійних компонентів комп'ютеризованих засобів керування та моніторингу систем безперебійного живлення з одночасним підвищенням їх енергоефективності та покращенням технічних характеристик. Успішне вирішення такої задачі можливе завдяки створенню інтелектуальних ДБЖ з високоефективними системами керування, які здатні функціонувати в умовах стохастичної зміни споживання електроенергії навантаженням.

В результаті проведеного огляду та критичного аналізу основних особливостей, тенденцій та перспектив розвитку методів та автоматизованих технічних засобів для керування та моніторингу систем безперебійного

живлення було виявлено їх переваги та недоліки, обґрунтовано вибір напрямку дослідження і сформульовано постановку задач дисертаційного дослідження:

1. Розробити імітаційну модель системи управління компонентами джерела безперебійного живлення, яка б враховувала зовнішні та внутрішні дестабілізуючі фактори на функціонування ДБЖ з метою дослідження їх впливу та покращення якості показників електропостачання.

2. Удосконалити метод адаптивного регулювання рівня завантаженості випрямляючих модулів джерела безперебійного живлення з можливістю зміни кількості навантажених випрямлячів в режимі реального часу з метою підвищення енергоефективності системи живлення.

3. Удосконалити метод керування випрямляючими модулями джерела безперебійного живлення шляхом адаптивного циклічного зміщення активних випрямлячів з метою підвищення надійності системи живлення.

4. Розробити метод керування компонентами джерел безперебійного живлення на основі використання нейромережевих технологій, який передбачає адаптивне ПД-регулювання процесу заряду акумуляторних батарей та короткострокове прогнозування споживання електроенергії.

5. Виконати практичне впровадження результатів дисертаційної роботи шляхом розробки на основі запропонованих моделей, методів та засобів апаратного, алгоритмічного та програмного забезпечення компонентів комп'ютеризованої системи керування та моніторингу джерел безперебійного живлення.

1.7 Висновки до розділу 1

В результаті огляду літературних джерел сформульовано такі висновки:

1. Джерела безперебійного живлення відносяться до класу пристроїв, які забезпечують електропостачання важливих об'єктів з необхідним рівнем якості та надійності. Ефективне їх застосування забезпечується високим ступенем автоматизації процесів керування та моніторингу для великої кількості режимів

експлуатації. Джерела безперебійного електроживлення функціонують в умовах невизначеності стану загальної електромережі та рівня споживання електроенергії навантаженням. Системи керування та моніторингу ДБЖ повинні відповідати зростаючим вимогам до енергоефективності та надійності їх роботи.

2. Розглянуто сучасні комп'ютеризовані системи керування та моніторингу джерел безперебійного живлення з точки зору їх надійності та енергоефективності. В результаті проведеного аналізу встановлено, що сучасний стан розвитку ДБЖ характеризується переважно високим рівнем резервування силових модулів та низьким значенням коефіцієнта їх завантаженості, що знижує ефективність роботи ДБЖ.

3. Визначено, що перспективним напрямком удосконалення систем керування та моніторингу джерел безперебійного електроживлення є розроблення нових та удосконалення існуючих методів та засобів на основі синтезу високоефективних інтелектуальних алгоритмів та моделей об'єкта управління. Враховуючи специфіку поставлених задач сформульовано вимоги до комп'ютеризованої системи керування та моніторингу ДБЖ.

4. Окреслено завдання, які в цій сфері на сьогодні залишаються невирішеними. Сформульовано та обґрунтовано основні задачі дисертаційного дослідження.

Основні наукові результати, викладені в першому розділі, опубліковані в роботах автора [1, 8–10].

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МОДУЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ

В даному розділі дисертаційної роботи розроблені моделі та методи підвищення показників енергоефективності та надійності роботи джерел безперебійного живлення. Критерії одночасного підвищення показників надійності та енергоефективності постачання електроенергії з використанням джерел безперебійного живлення є суперечливими. В цій ситуації задача оптимізації системи керування ДБЖ є багатокритеріальною. Для вирішення цієї задачі в дисертаційній роботі використовується метод імітаційного моделювання, який полягає в розробці та дослідженні моделі комп'ютеризованої системи управління компонентами ДБЖ з подальшим підтвердженням її адекватності за допомогою експериментальних досліджень на реальному об'єкті.

2.1 Структура комп'ютеризованої системи для моніторингу та керування компонентами джерела безперебійного живлення

Сучасні промислові джерела безперебійного електроживлення містять у своєму складі комп'ютеризовану систему, що забезпечує можливість дистанційного моніторингу стану ДБЖ, накопичення інформації про його параметри та аварійні ситуації в базі даних. Особливістю процесу управління компонентами джерел безперебійного живлення є те, що ДБЖ є системою реального часу і завдання, які вона виконує, спрямовані як на забезпечення надійного електропостачання важливих об'єктів, так і на мінімізацію споживання електроенергії. Сучасні джерела безперебійного живлення використовують систему керування з застосуванням мікроконтролерів (МК).

Типова структурно-функціональна схема комп'ютеризованої системи для моніторингу та керування компонентами джерела безперебійного електроживлення з вихідною напругою постійного струму наведена на рис. 2.1.

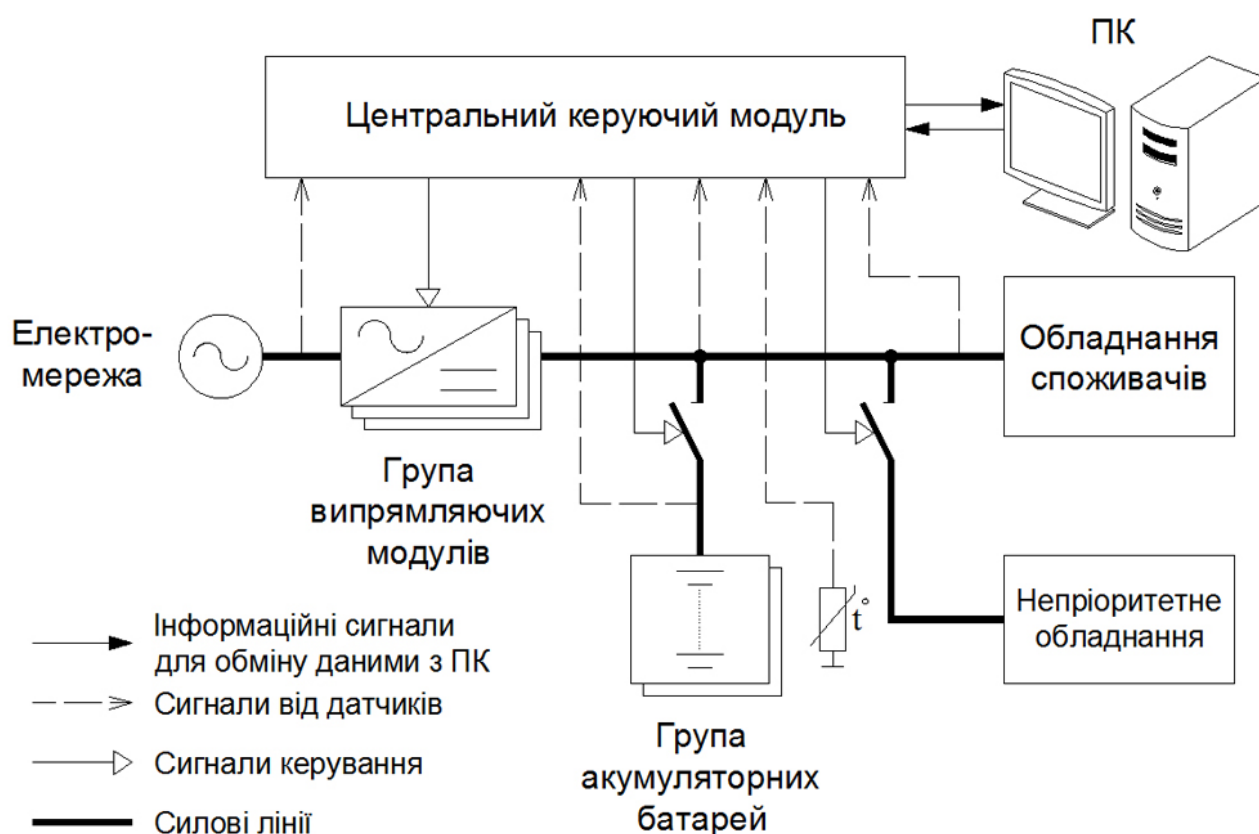


Рисунок 2.1 – Структурно-функціональна схема комп'ютеризованої системи для моніторингу та керування джерелом безперебійного електроживлення

Система безперебійного живлення, для якого розробляється комп'ютеризована система керування та моніторингу (КСКМ), являє собою ієрархічний програмно-апаратний комплекс, який складається з трьох взаємопов'язаних рівнів. СК, яка реалізована за цією архітектурою, включає в себе: підсистему моніторингу та контролю стану, підсистему керування, підсистему відображення та передачі інформації.

В нормальному режимі роботи навантаження живиться від випрямляючих модулів. Для підтримування акумуляторної батареї в повністю зарядженому

стані здійснюється її періодичне підзарядження. В аварійному режимі роботи – у випадку збоїв у загальній електромережі, електропостачання навантаження здійснюється від групи акумуляторних батарей.

Центральний керуючий модуль здійснює:

- вимірювання та моніторинг поточних значень електричних параметрів джерела безперебійного живлення;
- контроль справності компонентів та модулів;
- керування вихідною напругою ДБЖ в процесі заряду акумуляторних батарей;
- зберігання в енергонезалежній пам'яті інформації про зміни в режимах роботи ДБЖ і появу аварійних ситуацій;
- керування відключенням неперіоритетного навантаження при виникненні неполадок в зовнішній електромережі під час роботи від акумуляторної батареї, забезпечуючи тривалішу роботу важливого обладнання споживачів;
- зв'язок та обмін даними з ПЗ, яке встановлене на ПК оператора.

При проектуванні модульних ДБЖ, актуальним є питання вибору оптимальної конфігурації системи для забезпечення необхідної надлишковості модулів для досягнення заданих параметрів надійності, зокрема середнього часу напрацювання на відмову. Зазначена задача є особливо актуальною, тому що збільшуючи надлишковість модулів при навантаженому резервуванні відбувається зниження рівня завантаженості системи, що, в свою чергу, знижує показники енергоефективності, зокрема, ККД.

Відповідно до сформульованого в дисертаційній роботі завдання, необхідно розробити методи, які дозволять підвищити показники надійності та енергоефективності функціонування ДБЖ.

2.2 Метод адаптивного регулювання рівня завантаженості випрямляючих модулів джерела безперебійного живлення

Телекомунікаційне обладнання, до якого відноситься, наприклад, устаткування базових станцій мобільного зв'язку, характеризується випадковим характером споживання електроенергії. Рівень енергоспоживання такого обладнання може коливатися в досить широких межах і залежить він від кількості одночасно підключених абонентів, які здійснюють прийом чи передачу інформації з використанням цього обладнання.

При проектуванні ДБЖ для живлення телекомунікаційного обладнання, кількість випрямляючих модулів вибирають виходячи з максимально можливої потужності його споживання. Крім того, для забезпечення вищого рівня відмовостійкості, передбачають наявність надлишкових модулів. Однак, пікові навантаження в звичайних умовах експлуатації зустрічаються рідко, тому, як правило, рівень завантаженості типових ДБЖ знаходиться на низькому рівні (близько 30 %) [107]. Проблема низького навантаження на виході ДБЖ спричиняє суттєве зниження загального ККД усієї системи живлення, оскільки кожен з підключених випрямляючих модулів має певний рівень втрат холостого ходу, частка якого знижується при збільшенні коефіцієнта його завантаженості [113].

Для підвищення ККД джерела безперебійного живлення необхідно скорочувати надлишковість силових модулів та підвищувати їх завантаженість для того, щоб зменшити втрати холостого ходу в системі живлення. Виникає протиріччя, яке полягає в тому, що заходи, які сприяють покращенню показників надійності ДБЖ призводять до збільшення надлишковості силових модулів, а отже знижують його ККД.

На рис. 2.2 зображений типовий графік залежності коефіцієнта корисної дії випрямляючих модулів ДБЖ від коефіцієнта їх завантаженості K_{load} . З графіка видно, що зі збільшенням значення K_{load} підвищується ККД випрямлячів. Після досягнення значення коефіцієнта завантаженості 80 % ККД починає плавно знижуватись.

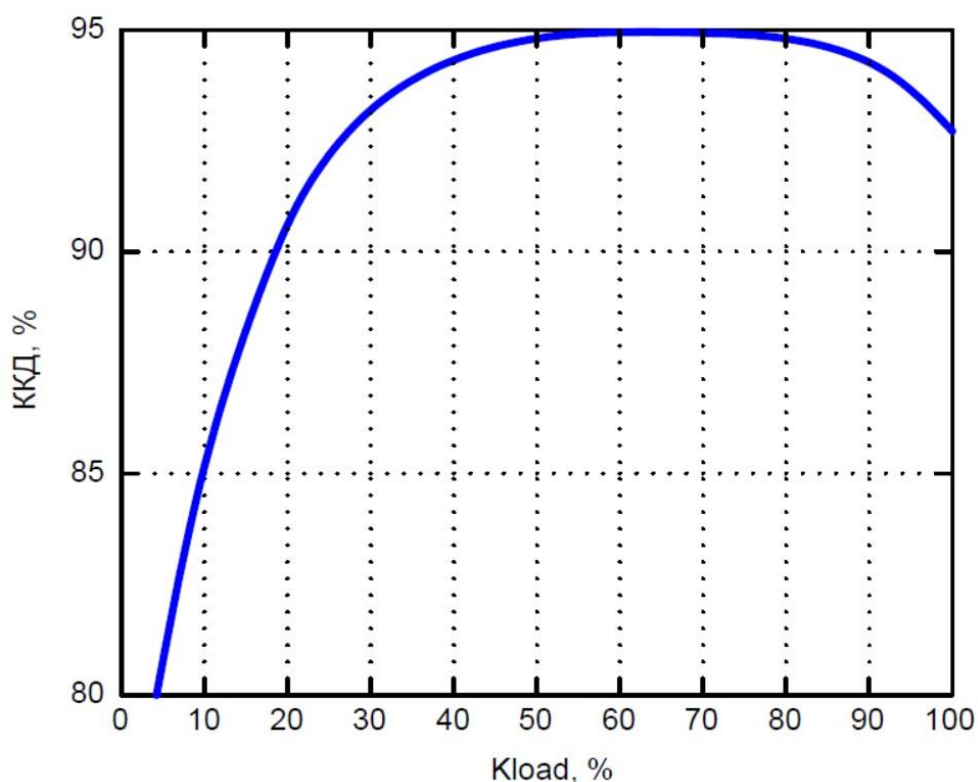


Рисунок 2.2 – Графік залежності ККД від коефіцієнта завантаженості випрямляючого модуля ДБЖ

В статті [105] була запропонована модель оцінки енергоефективності системи електроживлення, яка враховує ефект різкого падіння ККД на малих навантаженнях. Показано, що основний вклад в енергетичні втрати вносять втрати холостого ходу в компонентах системи живлення. Відзначено, що для підвищення ККД доцільно застосувати метод адаптивного підбору потужності випрямляючих модулів ДБЖ, для реалізації якого необхідно розробити алгоритм роботи інтелектуальної системи керування. Проте, реалізація такого алгоритму не була запропонована.

В дисертаційній роботі запропоновано метод адаптивного регулювання рівня завантаженості випрямляючих модулів ДБЖ в межах наперед заданого оптимального діапазону значень, який враховує коефіцієнт завантаженості випрямлячів та виконує його корекцію в режимі реального часу. Це дає змогу підвищити енергоефективність ДБЖ.

Суть цього методу полягає у реалізації алгоритму керування процесом їх включення та відключення для досягнення оптимального значення коефіцієнта їх завантаженості та підтримки його рівня в оптимальному діапазоні. Для реалізації та дослідження ефективності цього методу було запропоновано удосконалити апаратне забезпечення системи керування ДБЖ. Крім центрального керуючого модуля (ЦКМ), який відповідає за моніторинг та управління усією системою, в структуру ДБЖ було запропоновано додати модуль керування випрямлячами (МКВ). Структурна схема системи управління ДБЖ для реалізації запропонованого методу, яка пропонується в дисертаційній роботі, зображена на рис. 2.3.

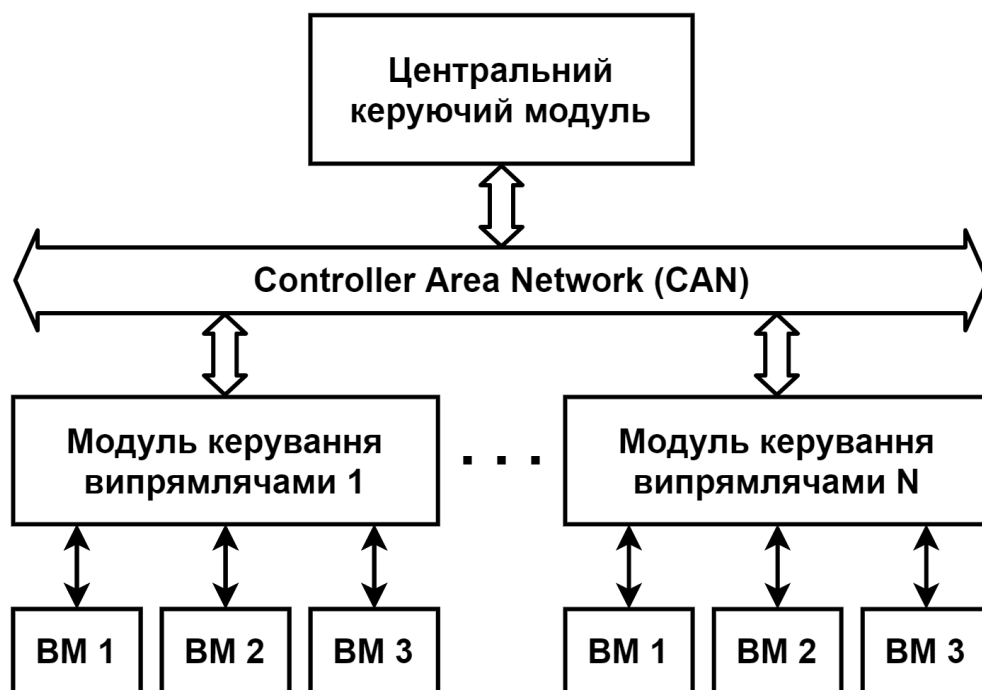


Рисунок 2.3 – Структурна схема системи керування компонентами джерела безперебійного живлення

Центральний керуючий модуль, реалізація якого описана в роботах автора [2, 11], відповідає за процес моніторингу параметрів підсистем ДБЖ, керує усіма режимами його роботи, здійснює періодичне збереження отриманих даних в енергонезалежній пам'яті та передачу їх в сервер. Модуль керування випрямлячами відповідає за реалізацію процесу їх комутації та здійснює

контроль їх стану. Зокрема, проводиться аналіз щодо того, чи знаходяться випрямлячі в стані перегріву та перевантаження. Для обміну даними між ЦКМ та МКВ було обрано інтерфейс CAN (Controller Area Network). Завдяки високому рівню надійності, він найкраще підходить для передачі даних та команд в розподіленій системі керування ДБЖ, яка використовується в даній роботі.

Алгоритм роботи системи керування, який реалізовує метод енергоефективного керування випрямляючими модулями працює наступним чином. На першому етапі здійснюється вимірювання значень струмів, які протікають в колах акумуляторних батарей (АБ), струму кола навантаження і значення вихідної напруги постійного струму, яка живить обладнання споживачів. Після цього відбувається діагностика стану випрямляючих модулів та визначається загальна кількість справних випрямлячів N_{all} . На наступному етапі розраховується споживана потужність ДБЖ P_{cons} на основі чого здійснюється розрахунок коефіцієнта завантаженості випрямлячів K_{load} за формулою:

$$K_{load} = \frac{P_{cons}}{N \cdot P_{nom}}, \quad (2.1)$$

де K_{load} – коефіцієнт завантаженості випрямлячів, N – кількість випрямлячів, які знаходяться в робочому стані, P_{nom} – номінальна потужність одного випрямляча; P_{cons} – активна потужність споживання електроенергії, яка розраховується за формулою:

$$P_{cons} = \left(I_{load} + \sum_{i=1}^m I_{BATi} \right) \cdot U_{out}, \quad (2.2)$$

де I_{load} – струм в колі навантаження, I_{BATi} – струм в колі i групи АБ, m – кількість груп АБ, U_{out} – вихідна напруга ДБЖ.

Отже, підставивши вираз (2.2) в (2.1), результуюча формула для розрахунку коефіцієнта завантаженості буде мати вигляд:

$$K_{load} = \frac{(I_{load} + \sum_{i=1}^m I_{BATi}) \cdot U_{out}}{N \cdot P_{nom}}. \quad (2.3)$$

Поточне значення коефіцієнта завантаженості випрямлячів K_{load} порівнюється з нижнім пороговим рівнем K_{min} та з верхнім пороговим рівнем K_{max} , які визначаються експериментальним шляхом та зберігаються в якості параметрів в енергонезалежній пам'яті центрального керуючого модуля ДБЖ.

У випадку, якщо значення K_{load} більше за пороговий рівень K_{max} ($K_{load} > K_{max}$), здійснюється обчислення прогнозованого значення коефіцієнта завантаженості випрямлячів K_{pred} за формулою:

$$K_{pred} = \frac{(I_{load} + \sum_{i=1}^m I_{BATi}) \cdot U_{out}}{(N_{op} + j) \cdot P_{nom}}, \quad (2.4)$$

де K_{pred} – прогнозоване значення коефіцієнта завантаженості випрямлячів;
 $j = \{1, 2, \dots, (N_{all} - N_{op})\}$ – кількість ітерацій циклу, N_{all} – загальна кількість справних випрямлячів, N_{op} – кількість ввімкнених випрямлячів.

Коефіцієнт j змінюється в циклі кожної ітерації на 1 в сторону збільшення починаючи від початкового значення, яке дорівнює 1, до тих пір, поки не виконається умова $K_{pred} \leq (K_{max} - H_{max})$, де H_{max} – значення гістерезису максимального порогового рівня коефіцієнта завантаженості випрямлячів, яке визначається експериментальним шляхом та зберігається в якості параметра в енергонезалежній пам'яті центрального керуючого модуля ДБЖ.

Якщо $K_{load} < K_{min}$, то здійснюється обчислення прогнозованого значення коефіцієнта завантаженості випрямлячів K_{pred} за формулою:

$$K_{pred} = \frac{(I_{load} + \sum_{i=1}^m I_{BATi}) \cdot U_{out}}{(N_{op} - j) \cdot P_{nom}}. \quad (2.5)$$

В цьому випадку коефіцієнт j зменшується на 1 кожної ітерації циклу починаючи від початкового значення 1, до тих пір, поки не виконається умова $K_{pred} \geq (K_{min} + H_{min})$, де H_{min} – значення гістерезису мінімального порогового рівня коефіцієнта завантаженості випрямляючих модулів.

В результаті виконання приведеного вище циклу, буде отримане результуюче прогнозоване значення кількості випрямлячів $N = N_{op(t+1)}$, які необхідно залишити у ввімкненому стані для того, щоб коефіцієнт їх завантаженості знаходився в заданому оптимальному діапазоні значень $K_{min} < K_{pred} < K_{max}$.

Після цього запускається підпрограма центрального керуючого модуля, яка надсилає команду керування по шині CAN до МКВ для ввімкнення необхідної кількості випрямляючих модулів $N = N_{op(t+1)}$.

2.3 Розробка імітаційної моделі комп'ютеризованої системи управління компонентами джерела безперебійного живлення

В якості інструмента для наукових досліджень в другому розділі дисертаційної роботи використовується метод імітаційного моделювання. Процес розробки точних моделей для дослідження роботи електротехнічного устаткування є важливим етапом перед проведенням експериментів на реальному об'єкті. Для дослідження ефективності запропонованого методу адаптивного регулювання рівня завантаженості випрямляючих модулів ДБЖ за критеріями співвідношенням показників надійності та енергоефективності було розроблено та досліджено імітаційну модель системи керування. Вона дає змогу здійснювати підключати необхідну кількість випрямляючих модулів джерела безперебійного живлення шляхом комутації в залежності від рівня їх завантаженості.

Для вирішення цієї задачі обрано програмне середовище візуального моделювання Simulink пакета прикладних програм (ППП) Matlab. Цей інструмент є досить гнучким і потужним засобом моделювання динамічних процесів при проведенні наукових досліджень. Особливість програмування в Simulink полягає у використанні графічних елементів з'єднаних між собою за допомогою інформаційних зв'язків, що дозволяє будувати послідовності операцій та алгоритми обробки даних. Шляхи передачі даних між елементами формуються за допомогою з'єднань, які утворюють послідовність виконання вмісту цих компонентів програмою. Елементи середовища Simulink являють собою графічне позначення певних математичних операцій. Однією з основних переваг Simulink є наявність великої кількості стандартних компонентів та функціональних блоків. Кожну елементарну операцію можна представити за допомогою стандартного компонента Simulink.

Для побудови імітаційної моделі керуючої логіки відмовостійкої системи модульного ДБЖ в дисертаційній роботі використано математичний апарат бібліотеки компонентів Stateflow, який базується на використанні логічних виразів та значно розширює можливості Simulink щодо моделювання складних динамічних систем, в тому числі і тієї, яка розглядається в даній роботі. Компоненти бібліотеки Stateflow підвищують рівень наочності моделі завдяки використанню засобів анімації, що дає змогу відобразити зміни в системі, які супроводжуються переходами з одного стану в інший. Блоки бібліотеки Stateflow та зв'язки між ними, які в процесі симуляції періодично виділяються іншим кольором, дали можливість прослідкувати за усіма етапами роботи модельованої системи та спостерігати її реакцію на появу тих чи інших подій. В процесі моделювання використано діаграми станів та переходів Statechart [142], запропоновані Д. Харелом (David Harel), які реалізовані в Simulink у вигляді компонента Chart.

Імітаційна модель системи керування для модульного ДБЖ в режимі адаптивного регулювання завантаженості випрямлячів, яка наведена на рис. 2.4, являє собою сукупність наступних елементів:

1. Набір вхідних сигналів:

- U_{out} – вихідна напруга ДБЖ;
- I_{load} – струм навантаження;
- I_{bat1}, I_{bat2} – струми, які протікають в колах акумуляторних батарей;
- $Noise$ – компонент для дослідження впливу завад на виході ДБЖ;
- $Random$ – компонент для імітації стохастичної зміни струму навантаження.

2. Вхідні параметри системи керування:

- K_{max}, K_{min} – верхній та нижній порогові рівні коефіцієнта завантаженості випрямлячів, значення яких в даній моделі становлять відповідно 0,8 та 0,5;
- P_{nom} – номінальна потужність одного силового модуля, яка в даному ДБЖ рівна 3 кВт. В загальному в даній системі передбачено 6 випрямлячів.

3. Блок Control Logic, який містить реалізацію логіки керування.

4. Блок Result, призначений для відображення результатів моделювання.

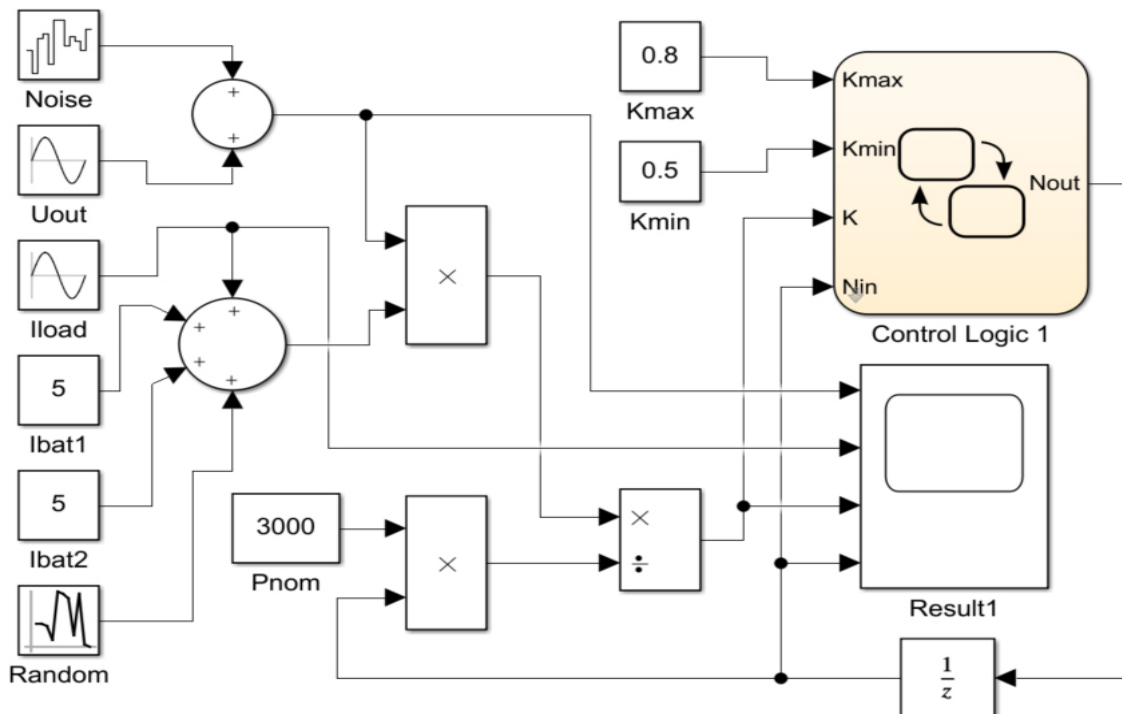


Рисунок 2.4 – Імітаційна модель системи керування для модульного ДБЖ в режимі адаптивного регулювання завантаженості випрямлячів

Блок Control Logic (рис. 2.5), який побудований з використанням інструменту Stateflow, реалізовує виконання алгоритму розрахунку необхідної кількості випрямляючих модулів, які потрібно підключити для того, щоб коефіцієнт їх завантаженості знаходився в межах оптиміального діапазону значень $K_{min} < K_{pred} < K_{max}$.

Рівень адекватності розробленої моделі забезпечується тим, що у ній враховано періодичну зміну струму навантаження та зміну вихідної напруги.

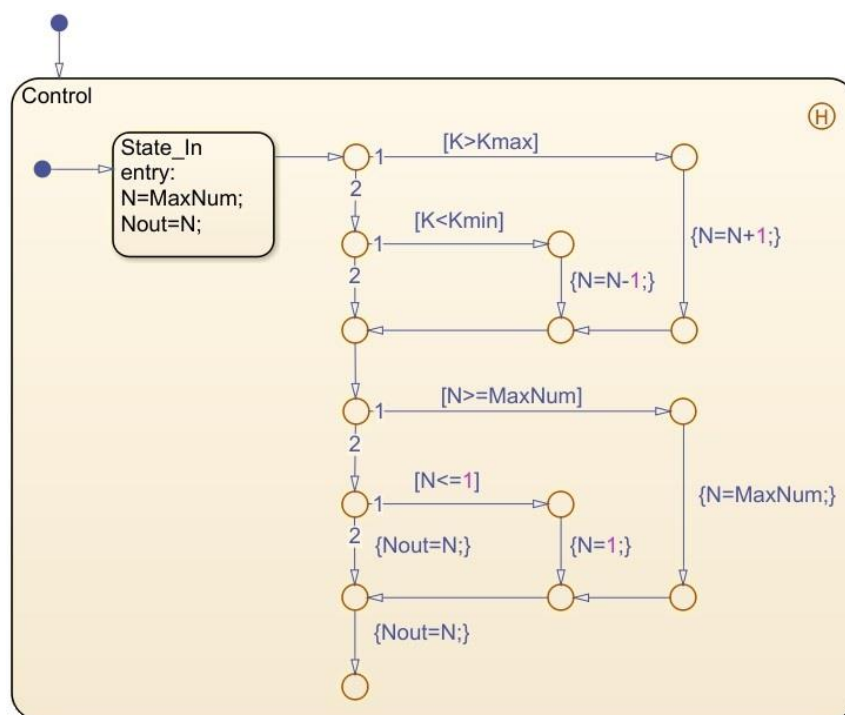


Рисунок 2.5 – Імітаційна модель алгоритму розрахунку необхідної кількості випрямлячів

Для заданої конфігурації системи керування ДБЖ було проведено моделювання, результати якого показані на рис. 2.6 у вигляді осцилограм блоку Result. На рис. 2.6а та рис. 2.6б показані залежності зміни вихідної напруги та струму в колі навантаження від часу, які спричиняють зміну коефіцієнта завантаженості випрямлячів (рис. 2.6в). Динаміка зміни кількості ввімкнених випрямляючих модулів показана на рис. 2.6г.

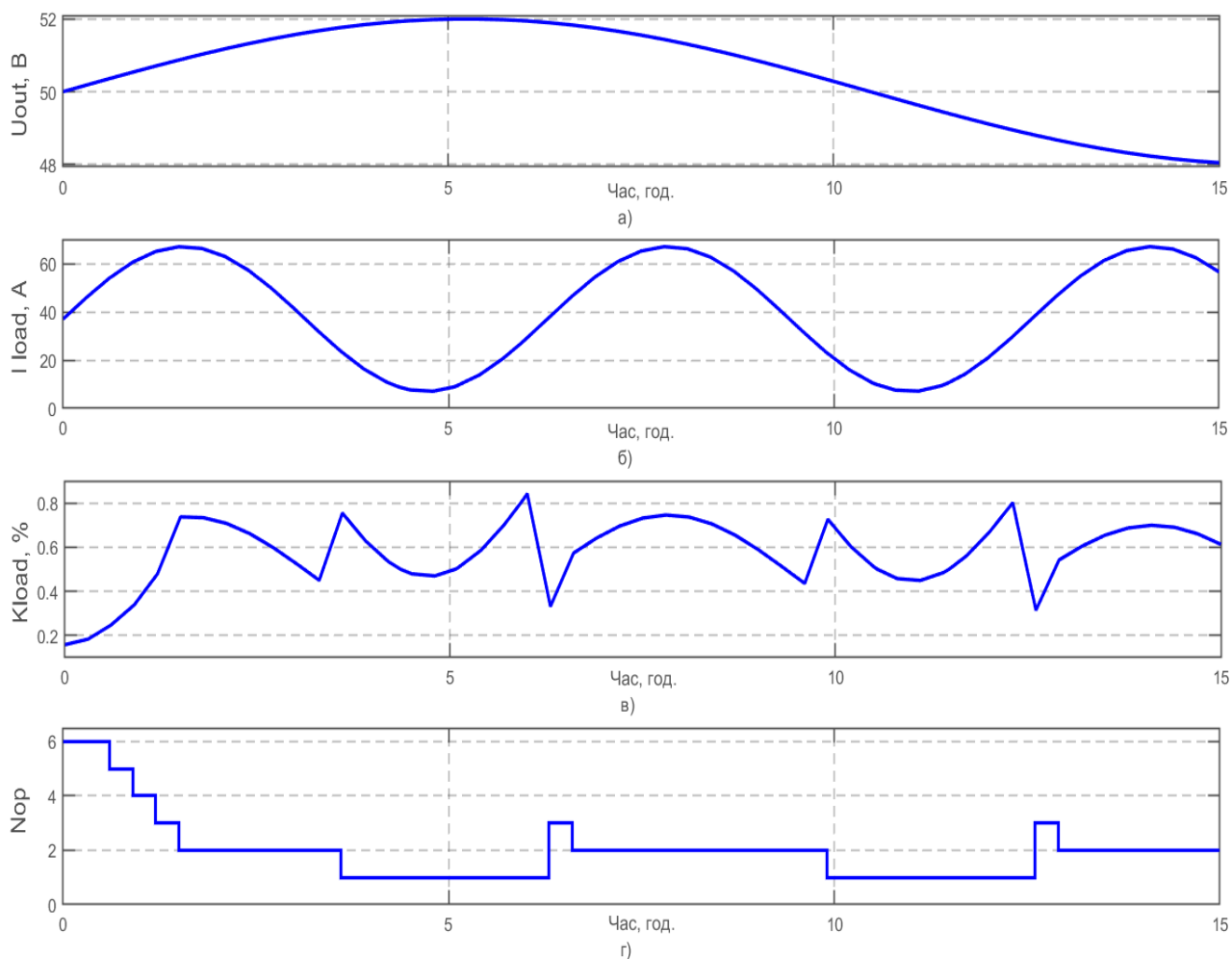


Рисунок 2.6 – Результати моделювання системи керування для модульного ДБЖ в режимі адаптивного регулювання навантаженості випрямлячів

Як видно з результатів моделювання (рис. 2.6в), коефіцієнт навантаженості випрямлячів знаходиться в межах заданого діапазону (0,5 ... 0,8) за виключенням кількох амплітудних значень. Комутація випрямляючих модулів здійснюється таким чином, щоб принаймні один з них завжди залишався у ввімкненому стані.

В результаті імітаційного моделювання був відпрацьований алгоритм енергоефективного керування випрямляючими модулями джерела безперебійного живлення. Результати продемонстрували, що в процесі зміни вхідних сигналів система підбирає таку кількість ввімкнених випрямляючих модулів, яка забезпечує перебування коефіцієнта навантаженості системи в межах наперед заданого оптимального діапазону значень. Завдяки цьому забезпечується енергоефективний режим роботи випрямлячів ДБЖ.

Розроблений алгоритм енергоефективного керування випрямляючими модулями був впроваджений в реальній системі керування модульним джерелом безперебійного живлення, що підтверджено експериментальними дослідженнями, результати яких представлені в четвертому розділі дисертації.

2.4 Метод керування випрямляючими модулями джерела безперебійного живлення шляхом їх адаптивного циклічного зміщення

Однією з найважливіших технічних характеристик ДБЖ є її надійність, яка показує здатність коректно функціонувати впродовж заданого часового проміжку. При проектуванні ДБЖ виникає протиріччя між надійністю функціонування ДБЖ, що вимагає надлишковості, гарячого резервування, додаткових енергозатрат та енергоефективністю системи живлення. Відомі підходи щодо підвищення надійності ДБЖ, потребують певного компромісу з вимогами до його енергоефективності. Однак, одночасне покращення обох цих параметрів є надзвичайно важливим для багатьох об'єктів. Тому розробка методів та програмно-апаратних засобів, які дозволять підвищити як показники надійності так і показники енергоефективності джерел безперебійного живлення, є актуальною науково-технічною задачею.

Огляд та аналіз відомих результатів досліджень, проведений в першому розділі дисертації, показав, що існуючі методи та програмно-алгоритмічні засоби, які використовуються для підвищення показників надійності ДБЖ, зокрема збільшення надлишковості силових модулів та їх резервування, призводять до зниження енергоефективності системи. Однак, шляхи підвищення показників енергоефективності в цих роботах не розглядаються.

Метод адаптивного регулювання рівня завантаженості випрямляючих модулів, який описаний в попередньому підрозділі, дозволяє покращити показники енергоефективності разом із підвищенням надійності модульних систем безперебійного живлення. Однак, в результаті проведених досліджень було виявлено, що застосування цього методу спричиняє нерівномірну

тривалість роботи випрямляючих модулів в навантаженому стані. Це пов'язано з тим, що якщо виникала необхідність відключити певну кількість випрямлячів, щоб коефіцієнт завантаженості перебував в межах оптимального діапазону значень, то відключалися одні і ті самі модулі. Саме тому виникає необхідність розробки методу, який дозволить усунути цей недолік, досягнувши рівномірної тривалості роботи випрямляючих модулів, скоротивши його до мінімальних значень.

Для підвищення надійності функціонування ДБЖ запропонований метод керування випрямляючими модулями, який передбачає адаптивне циклічне зміщення активних випрямлячів. Суть методу полягає у керуванні процесом періодичного зміщення ввімкнених випрямлячів джерела безперебійного живлення постійного струму шляхом послідовного включення в роботу кожного наступного модуля з числа їх ненавантаженого резерву та відключення попереднього. Це дасть змогу збільшити середній час їх напрацювання на відмову, що, в свою чергу, підвищить тривалість безвідмовної роботи джерела безперебійного живлення, який є одним з найважливіших показників надійності.

Детальніше алгоритм роботи можна описати наступним чином. Під час запуску функції центрального керуючого модуля, яка реалізує метод корекції сумарної вихідної потужності випрямлячів, вираховується прогнозоване значення кількості випрямляючих модулів ДБЖ, які необхідно залишити у ввімкненому стані для того, щоб коефіцієнт їх завантаженості знаходився в заданому оптимальному діапазоні значень, при якому досягається максимальна енергоефективність їх роботи.

Після цього центральний керуючий модуль посилає команду по шині CAN до модулів керування випрямлячами для ввімкнення або вимкнення потрібної кількості випрямляючих модулів. Якщо в результаті цієї комутації відключається один або більше модулів, запускається процес їх зміщення для забезпечення рівномірної тривалості їх роботи.

Розглянемо реалізацію цього процесу на прикладі системи, яка містить три випрямляючих модуля. Припустимо, для досягнення оптимального коефіцієнта

завантаженості системи, достатньо залишити в роботі два випрямляча. На першому етапі ввімкненими залишаються два крайні модулі, а останній вимикається. Через деякий період часу запускається цикл зміщення шляхом підключення одного додаткового модуля. Через короткий проміжок часу, який може становити від 20 до 40 секунд, впевнившись, що новий випрямляючий модуль (ВМ) успішно запустився, МК відключає перший випрямляч. Після цього етапу процес зміщення випрямляючих модулів переходить в режим очікування на період, який задається в параметрах налаштувань і може становити від кількох годин до кількох діб. Після завершення цього етапу, процес повторюється з наступним випрямляючим модулем і т.д.

Однією з першочергових задач є розробка та дослідження імітаційної моделі керуючого алгоритму, який реалізовує даний метод, для перевірки його ефективності. Для цього була розроблена модель системи керування випрямляючими модулями джерела безперебійного живлення, в якій реалізований відповідний алгоритм його роботи. Для розробки моделі було використано середовище візуального моделювання Simulink та математичний апарат бібліотеки компонентів Stateflow з застосуванням діаграм станів та переходів.

Удосконалена імітаційна модель алгоритму керування випрямляючими модулями ДБЖ наведена на рис. 2.7. Вона являє собою сукупність наступних елементів:

1. Набір вхідних сигналів: U_{out} – вихідна напруга ДБЖ; I_{load} – струм навантаження; I_{bat1}, I_{bat2} – струми, які протікають в колах акумуляторних батарей; $Noise$ – компонент для дослідження впливу завад на виході ДБЖ; $Random$ – компонент для імітації стохастичної зміни струму навантаження.

2. Вхідні параметри системи керування: K_{max}, K_{min} – верхній та нижній порогові рівні коефіцієнта завантаженості випрямлячів, значення яких в даній моделі становлять відповідно 0,8 та 0,5; P_{nom} – номінальна потужність одного

випрямляючого модуля, яка в даному ДБЖ рівна 3 кВт. В загальному в даній системі передбачено 3 випрямлячі.

3. Блоки Control Logic 1 і Control Logic 2, які містять реалізацію логіки керування у вигляді діаграм станів та переходів.

4. Блоки Result1 і Result2, призначені для відображення результатів моделювання.

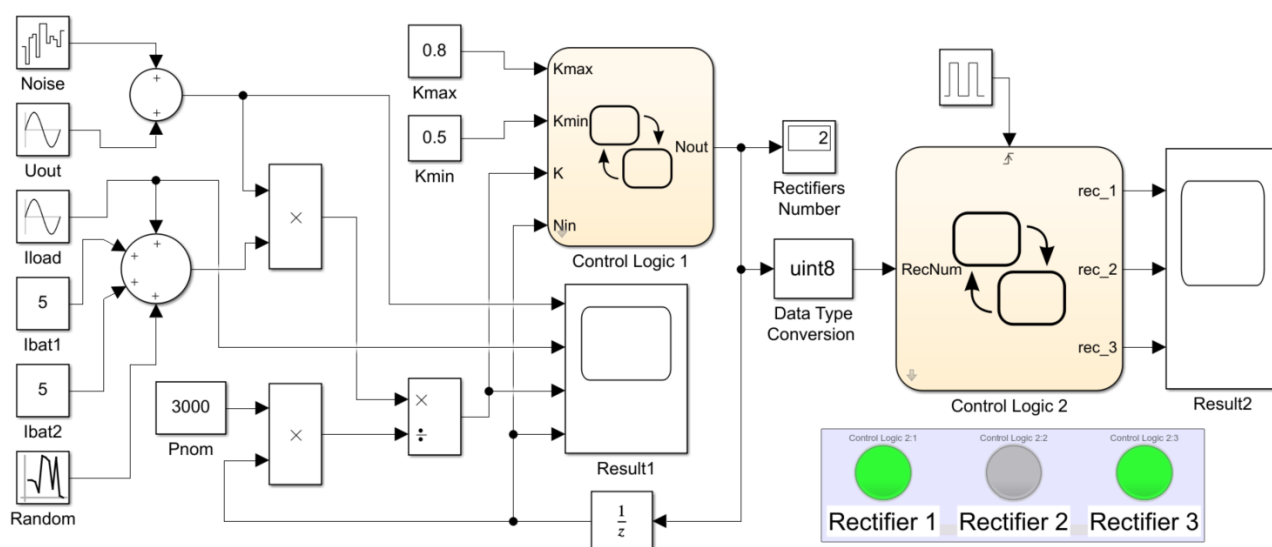


Рисунок 2.7 – Удосконалена імітаційна модель системи управління компонентами джерела безперебійного живлення

Блок Control Logic 1 реалізовує виконання розрахунку необхідної кількості випрямлячів, які необхідно підключити для того, щоб коефіцієнт їх завантаженості знаходився в межах оптимального діапазону значень. Блок Control Logic 2, який побудований з використанням діаграм станів та переходів (рис. 2.8) бібліотеки Stateflow, реалізовує виконання алгоритму керування процесом зміщення ввімкнених випрямляючих модулів системи безперебійного живлення.

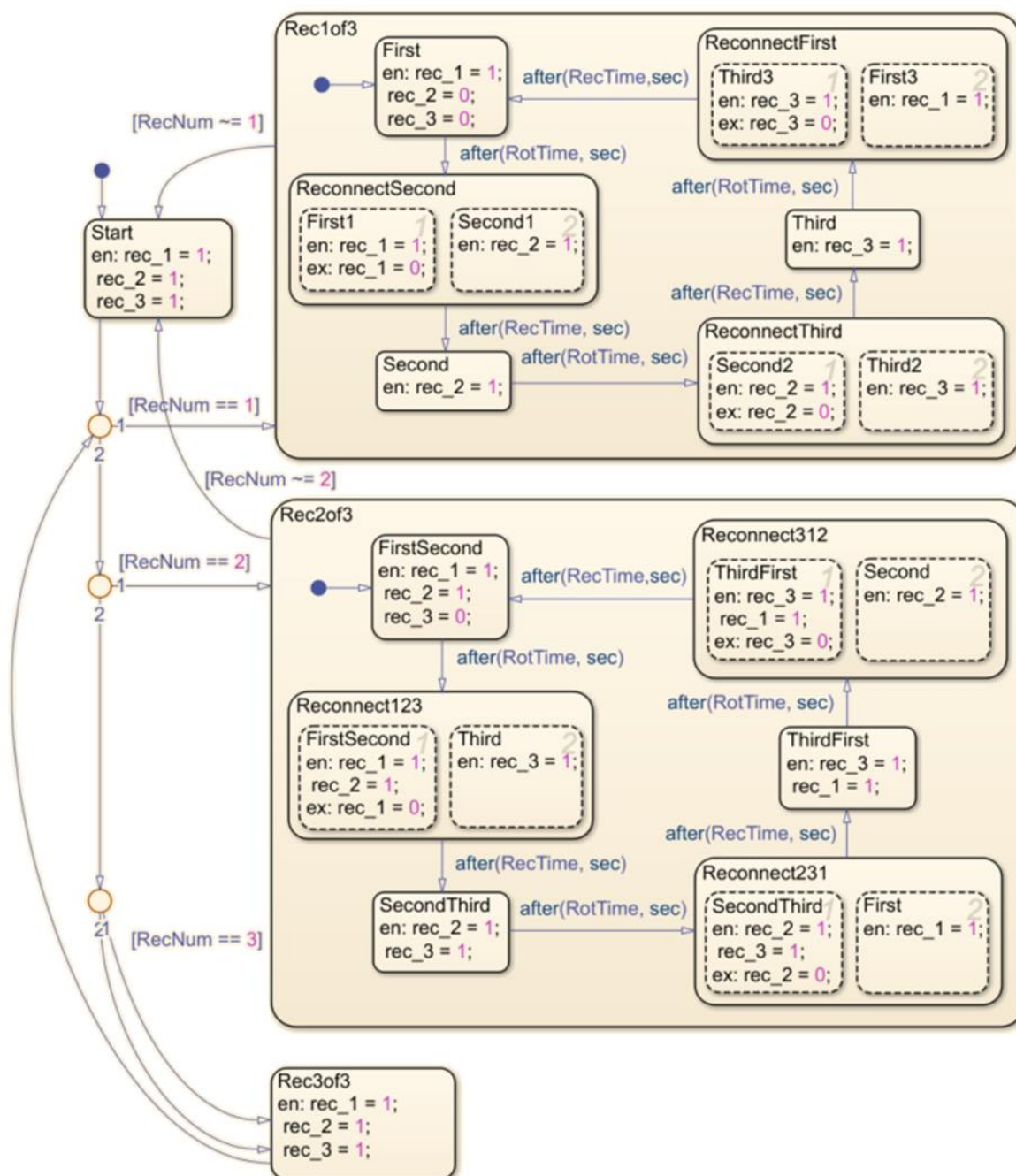


Рисунок 2.8 – Блок-схема станів та переходів алгоритму керування процесом зміщення ввімкнених випрямляючих модулів комп'ютеризованої системи безперебійного живлення

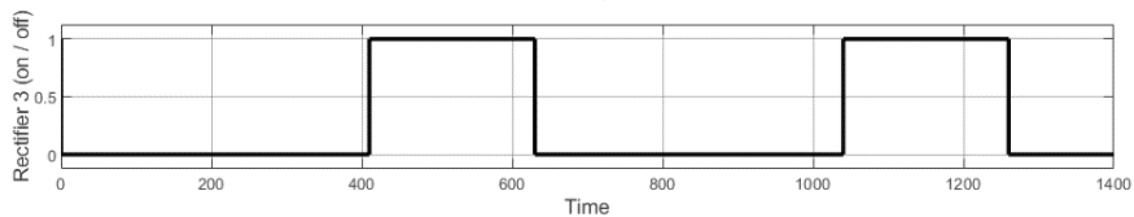
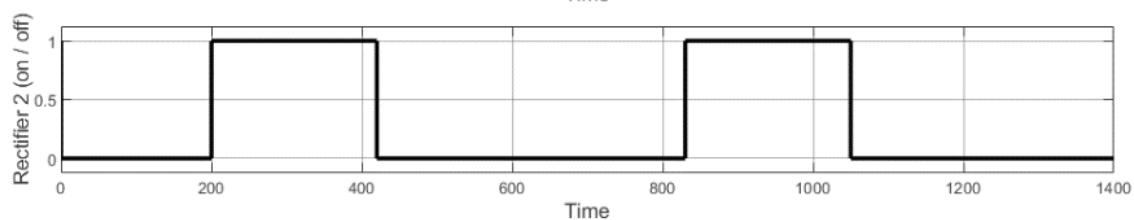
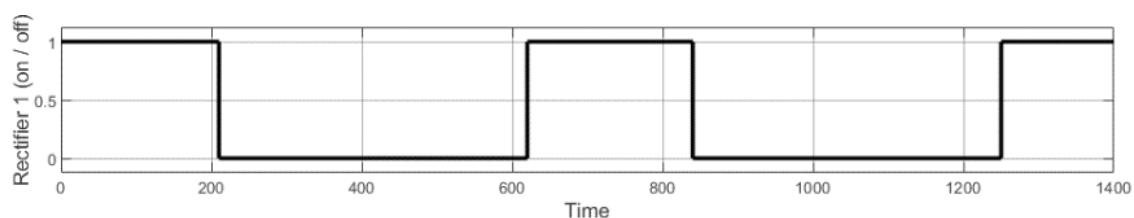
На початковому етапі роботи алгоритму, який описаний в роботі здобувача [22], усі випрямляючі модулі перебувають у ввімкненому стані. Кількість модулів, які повинні бути включеними одночасно в процесі їх ротації задаються вхідним сигналом RecNum. Ця кількість залежить від коефіцієнта завантаженості випрямляючих модулів, який розраховується шляхом ділення

значення споживаної потужності на номінальну потужність ДБЖ. Після отримання даних про необхідну кількість підключених модулів, відбувається перехід до одного з блоків (Rec1of3, Rec2of3 або Rec3of3). Два перші блоки складаються з шести станів, перехід між якими здійснюється послідовно. Тривалість переходу між цими станами може бути довгим (RotTime) і коротким (RecTime). Значення цих часових інтервалів встановлюються у налаштуваннях компонента Control Logic 2. Тривалість короткого часового інтервалу може становити від двадцяти до сорока секунд. Впродовж цього часу здійснюється підключення наступного випрямляючого модуля ДБЖ в процесі їх циклічного зміщення. Тривалість довгого часового інтервалу може змінюватися в діапазоні від кількох годин до кількох діб в залежності від параметрів налаштувань. Цей інтервал відповідає тривалості роботи кожної наступної комбінації ввімкнених випрямляючих модулів ДБЖ під час їх ротації.

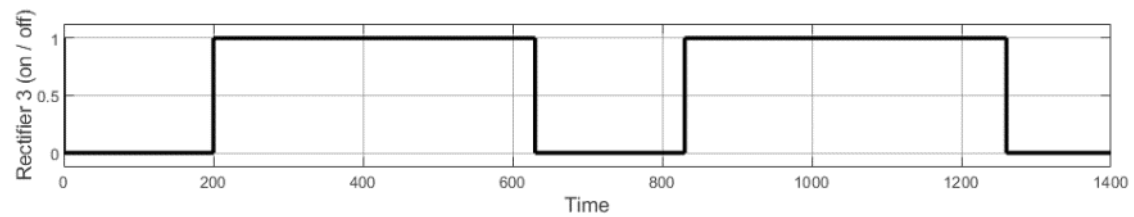
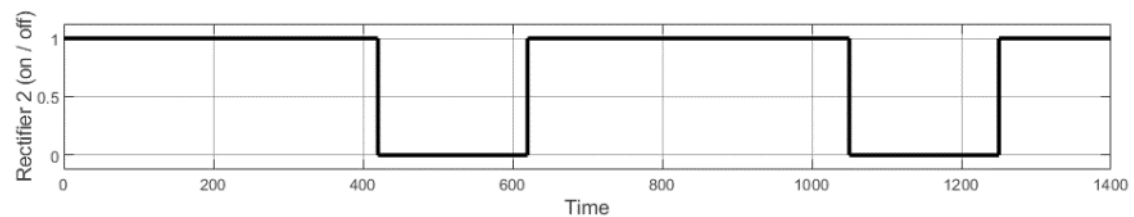
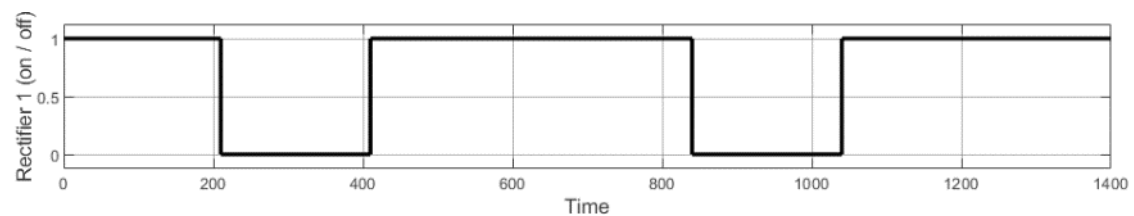
Для системи керування ДБЖ, яке містить три випрямлячі, було проведено моделювання, результати якого показані у вигляді осцилограм блоку Result 2. На рис. 2.9 показані часові діаграми зміни стану випрямляючих модулів для випадку комбінації одного з трьох ввімкнених силових модулів ДБЖ (рис. 2.9а) та комбінації двох з трьох ввімкнених випрямляючих модулів ДБЖ (рис. 2.9б). Високий рівень сигналу відповідає ввімкненому стану відповідного модуля, а низький – вимкненому.

Як видно з результатів моделювання, переключення випрямляючих модулів здійснюється таким чином, що принаймні один з них завжди залишається у ввімкненому стані. Під час здійснення чергового циклу зміщення випрямлячів, спочатку відбувається ввімкнення наступного модуля, а через деякий час, який відповідає тривалості перехідного процесу, здійснюється вимкнення попереднього.

З наведених осцилограм можна зробити висновок, що запропонований метод забезпечує рівномірний час роботи випрямляючих модулів, що в свою чергу збільшить середній час напрацювання на відмову та, відповідно, тривалість безвідмовної роботи компонентів джерела безперебійного живлення.



а)



б)

Рисунок 2.9 – Результати моделювання системи керування для модульного ДБЖ в режимі циклічного зміщення ввімкнених випрямлячів: а) часова діаграма зміни ввімкненого та вимкненого станів комбінацій одного з трьох випрямляючих модулів ДБЖ; б) часова діаграма зміни ввімкненого та вимкненого станів двох з трьох випрямляючих модулів ДБЖ

Результати імітаційного моделювання показали, що запропоновані методи забезпечують рівномірний час роботи випрямляючих модулів та зниження загальної тривалості їх роботи. Були проведені експериментальні дослідження, в межах яких дослідна установка модульного ДБЖ тестувалася в лабораторних умовах з імітуванням екстремальних умов експлуатації (зміни навантаження, напруги живлення, температури, циклів включень-виключень та ін.). Після опрацювання статистичних даних, отриманих в результаті проведених досліджень, було виявлено, що при застосуванні запропонованих методів середній час напрацювання на відмову випрямляючих модулів ДБЖ збільшується на 5-8 %.

2.5 Висновки до розділу 2

1. Описано процес взаємодії компонентів ієрархічної багаторівневої системи керування та моніторингу стану модульних джерел безперебійного живлення на основі адаптивної корекції завантаженості випрямляючих модулів і використання алгоритму їх циклічного зміщення, що дає змогу системі автоматично змінювати свою структуру та поведінку без втручання обслуговуючого персоналу.

2. Розроблено імітаційну модель системи управління компонентами джерела безперебійного живлення з представленням її компонентів через графи станів та переходів, яка враховує зовнішні та внутрішні дестабілізуючі фактори на функціонування ДБЖ з метою дослідження їх впливу, що є основою для підвищення надійності системи електроживлення та покращення якості показників електропостачання.

3. Розроблено метод адаптивного регулювання рівня завантаженості випрямлячів модульного джерела безперебійного живлення в межах наперед заданого оптимального діапазону значень, який відрізняється від відомих можливістю зміни кількості навантажених випрямлячів в режимі реального часу,

що дало змогу знизити втрати від роботи випрямляючих модулів та підвищити таким чином енергоефективність ДБЖ.

4. Розроблено метод циклічного зміщення навантажених випрямляючих модулів джерела безперебійного живлення, в основу якого покладено рівномірне зменшення часу, протягом якого вони знаходяться у ввімкненому стані, що дало змогу підвищити показник надійності, зокрема, середній час напрацювання на відмову без зниження енергоефективності їх роботи.

Основні наукові результати, викладені в другому розділі, опубліковані в роботах автора [3, 4, 12, 15, 22].

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ КЕРУВАННЯ КОМПОНЕНТАМИ МОДУЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ НА ОСНОВІ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Метою даного розділу є удосконалення методів інтелектуального керування модульними джерелами безперебійного живлення на основі використання адаптивних алгоритмів з застосуванням технологій штучних нейронних мереж. Запропоновано метод адаптивного ПД-регулювання процесу заряду акумуляторних батарей та метод короткострокового прогнозування споживання електроенергії обладнанням, яке живиться від ДБЖ.

3.1 Удосконалення підсистеми керування ДБЖ в режимі регулювання струму заряду АБ

Однією з основних функцій центрального керуючого модуля джерела безперебійного живлення є управління процесом регулювання вихідної напруги випрямляючих модулів з одночасним регулюванням струму заряду акумуляторних батарей відповідно до рекомендованих режимів їх роботи, зокрема, щодо обмеження струму заряду. Особливо важливим є керування напругою випрямляючих модулів у перехідних режимах під час комутації АБ таким чином, щоб не допустити значних стрибків струмів в колах акумуляторних батарей, які негативно впливають на них, призводячи до скорочення їх терміну служби.

В традиційних ДБЖ для захисту вихідних кіл акумуляторних батарей та випрямляючих модулів від значних перепадів струму під час їх комутації, використовується алгоритм пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулювання для управління вихідною напругою випрямляючих модулів. Тому центральний керуючий модуль ДБЖ можна вважати компонентом замкненої системи керування зі зворотнім зв'язком по струму в колі АБ. Формула

пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання для управління вихідною напругою випрямляючих модулів має вигляд:

$$u(t) = K_P \left[i(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t i(t) dt + T_D \frac{di(t)}{dt} \right], \quad (3.1)$$

де $u(t)$ – вихідна напруга випрямляючого модуля, K_P – коефіцієнт підсилення в колі зворотного зв'язку, $i(t)$ – відхилення струму в колі акумуляторних батарей від заданого в момент часу t , T_D і T_I – сталі часу відповідно диференціювання та інтегрування.

Існують методи і алгоритми самоналаштування ПІД-контролерів, суть яких в більшості зводиться до ускладнення алгебраїчних обчислень з введенням багатьох нових параметрів системи. Для складних систем з багатомірними взаємозв'язаними динамічними вузлами значно ускладнюється математичний апарат їх опису і синтезу системи оптимального керування. В системі управління такими об'єктами важко добитися оптимальних налаштувань параметрів регуляторів побудованих за класичними методами, зокрема ПІД-керування, для досягнення потрібної точності регулювання у всіх можливих діапазонах для вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації. Як правило, коефіцієнти регулювання підбирають експериментальним шляхом в залежності від параметрів та режимів роботи конкретного ДБЖ.

З метою адаптації закону ПІД-регулятора для застосування в дискретній системі керування, формула (3.1) була приведена до вигляду, який зручно реалізувати на мікроконтролері [7]:

$$u_t = u_{t-1} + A_P \cdot i_t + A_I \cdot i_{t-1} + A_D \cdot i_{t-2},$$

де A_P , A_I , A_D – коефіцієнти відповідно пропорційної, інтегральної і диференціальної складових.

$$A_P = K_P \cdot \left(1 + \frac{T_0}{2 \cdot K_I} + \frac{K_D}{T_0} \right),$$

$$A_I = -K_P \cdot \left(1 - \frac{T_0}{2 \cdot K_I} + \frac{2 \cdot K_D}{T_0} \right),$$

$$A_D = \frac{K_P \cdot K_D}{T_0}.$$

де K_P , K_I і K_D – відповідно пропорційний, інтегральний і диференціальний коефіцієнти, T_0 – період квантування, який може змінюватись програмно.

В результаті дискретна передаточна керуюча функція контролера для регулювання струму заряду АБ ДБЖ була приведена до виразу:

$$W_P(z) = K_P \left[1 + \frac{T_0 \cdot (1 + z^{-1})}{2 \cdot K_I \cdot (1 - z^{-1})} + \frac{K_D}{T_0} \cdot (1 - z^{-1}) \right].$$

Коефіцієнти K_P , K_I і K_D потрібно змінювати залежно від типу і стану АБ, параметрів випрямляючих модулів, характеру навантаження і т. п. Всі ці коефіцієнти вимагають оптимального налаштування.

ПД-регулятор забезпечує відмінну якість регулювання тільки при певних стабільних параметрах системи. У динамічних процесах зі змінними параметрами, нелінійностями і завадами, які виникають в процесі вимірювання електричних параметрів ДБЖ, досить важко забезпечити оптимальні налаштування коефіцієнтів для усіх режимів роботи системи, тому якість регулювання істотно падає. Система живлення телекомунікаційного обладнання зазвичай функціонує в умовах невизначеності та стохастичних змін споживання електроенергії, які змінюють режим функціонування ДБЖ, а тому потребують зміни ПД-коефіцієнтів. Отже, актуальною задачею є синтез підсистеми керування ДБЖ на базі адаптивних ПД-регуляторів.

3.2 Синтез ШНМ для реалізації методу адаптивного ПД-регулювання струму заряду акумуляторних батарей

Використання традиційних методів лінійної теорії автоматичного управління не дає змоги забезпечити повну адекватність динамічних характеристик розробленої системи керування та еталонної моделі. Однією з альтернатив класичним методам є модель управління на основі використання штучних нейронних мереж. За останні роки відбувається суттєве підвищення інтересу до застосування нейромережових технологій для вирішення великої кількості задач. Їх використання дозволяє отримати необхідну динаміку процесів в об'єктах, які володіють як лінійними так і нелінійними характеристиками.

До переваг застосування ШНМ відносять стійкість до помилок, які можуть виникнути у випадку появи пошкоджень з'єднань між нейронами, підвищення швидкості обробки даних завдяки паралельній роботі нейронів. Існує ряд характеристик, якими повинна володіти задача, для того, щоб було доцільно застосовувати нейронні мережі для її розв'язання:

- відсутній чіткий алгоритм вирішення задачі, але існує достатня кількість накопичених прикладів;
- система володіє значними обсягами вхідних даних;
- інформація надлишкова або неповна з наявністю протиріч.

Варто відмітити, що застосування методів штучного інтелекту має бути направлене на підвищення технічних характеристик проектованої системи безперебійного живлення – лише за цієї умови забезпечується інтелектуальність комп'ютеризованої системи, як засобу керування та моніторингу. Необхідною умовою інтелектуальності системи є її адаптивність, тобто здатність системи пристосовуватись до змін оточуючого середовища з метою покращення функціонування відповідно до певних заданих критеріїв [136, 137].

Здатність до навчання за певними правилами і алгоритмами є однією з основних переваг штучних нейронних мереж. Для цього потрібно лише забезпечити правильний набір навчальних даних і вибрати адекватну структуру

нейронної моделі. Ця властивість дає змогу застосувати ШНМ для вирішення конкретної задачі регулювання ПІД-коефіцієнтів для адаптивного керування струмом АБ джерела безперебійного живлення.

Для керування компонентами ДБЖ, яке характеризується функціонуванням в умовах стохастичної зміни величини навантаження та внутрішніх параметрів, запропонована схема нейронного управління з налаштуванням коефіцієнтів ПІД-регулювання, яка представлена на рис. 3.1.

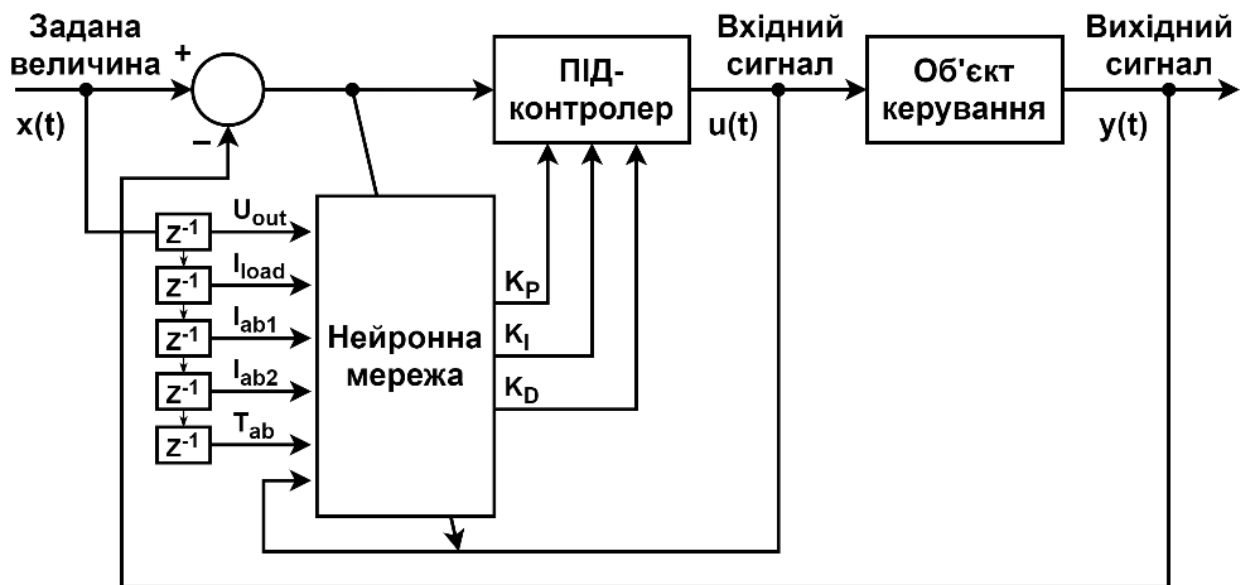


Рисунок 3.1 – Структурна схема нейронного керування з адаптивним налаштуванням ПІД-коефіцієнтів

Задача синтезу нейронної мережі складається з двох підзадач:

1. Вибір оптимальної структури ШНМ.
2. Налаштування значень вагових коефіцієнтів.

На якість навчання ШНМ та, відповідно, на похибку регулювання впливає конфігурація архітектури нейронної мережі та вибір функції активації. В процесі вибору архітектури ШНМ важливе значення має кількість прихованих шарів та кількість входних та вихідних нейронів.

Для системи керування ДБЖ засобами імітаційного моделювання виконано пошук топології ШНМ, яка була б найбільш ефективною за критеріями

точності регулювання струму заряду АБ. Під час синтезу штучної нейронної мережі вибрано її архітектуру для коректного відтворення властивостей компонентів ДБЖ (рис. 3.2). Для цього було визначено кількість шарів ШНМ та зв'язки між ними, кількість нейронів для кожного шару, тип функцій активації. Для того, щоб врахувати нелінійність об'єкта керування обрано ШНМ, з різними функціями активації – нелінійною для проміжного шару та лінійною для вихідного. На першому етапі була задана початкова кількість нейронів в кожному з шарів. В подальшому, аналізуючи ефективність навчання ШНМ обраної структури, поступово було здійснено її модифікацію.

Синтез та дослідження ШНМ виконано з використанням бібліотеки компонентів Neural Network Toolbox ППП Matlab. Цей інструмент обрано з огляду на те, що він має усі необхідні засоби для моделювання нейронних мереж з застосуванням популярних алгоритмів навчання. В цій програмі було синтезовано штучну нейронну мережу та проводилося дослідження її можливостей для оптимального вибору ПІД-коефіцієнтів для задачі регулювання струму заряду акумуляторних батарей ДБЖ.

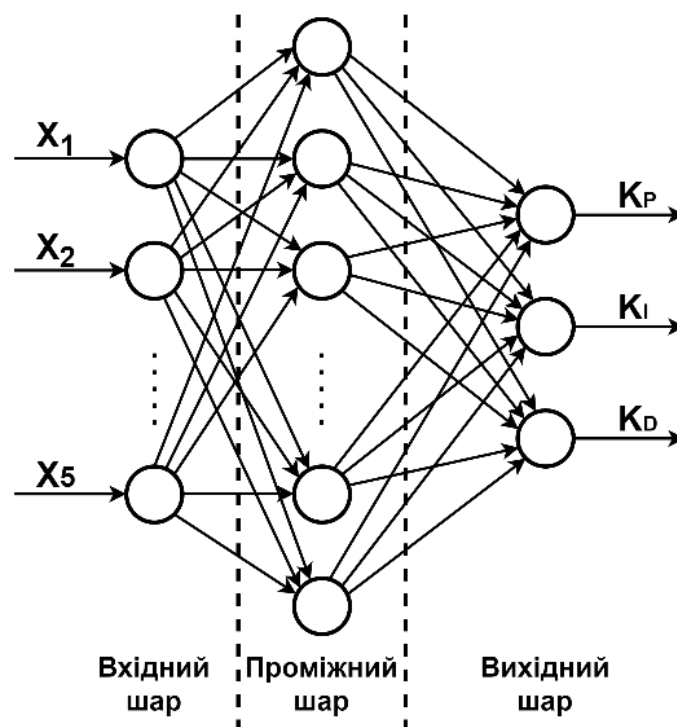


Рисунок 3.2 – Структура нейронної мережі нейроконтролера

В результаті, для вирішення завдань управління струмом заряду АБ джерела безперебійного живлення використано просту ШНМ з прямим розповсюдженням сигналу (feed-forward) та зворотним поширенням помилки (рис. 3.3). Вхідний шар містить п'ять нейронів а проміжний – десять. Для проміжного шару проєктованої ШНМ використано функцію активації – гіперболічний тангенс (рис. 3.4), оскільки вона підсилює малі значення сигналів, а для вихідного шару – лінійну функцію. Застосування нелінійних функцій активації в ШНМ для проміжних шарів дає змогу вирішувати задачі з суттєво нелінійними обмеженнями, до яких відноситься і задача регулювання ПД-коефіцієнтів ДБЖ. Вихідні нейрони мережі формують масштабовані коефіцієнти ПД-регулятора K_P , K_I і K_D .

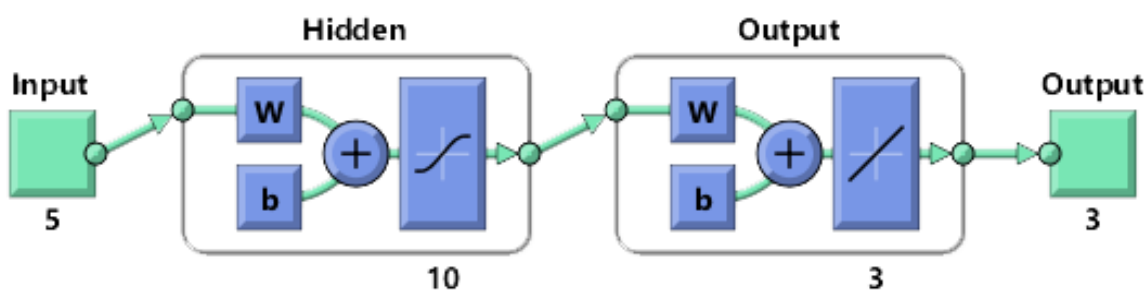


Рисунок 3.3 – Структура нейронної мережі нейроконтролера

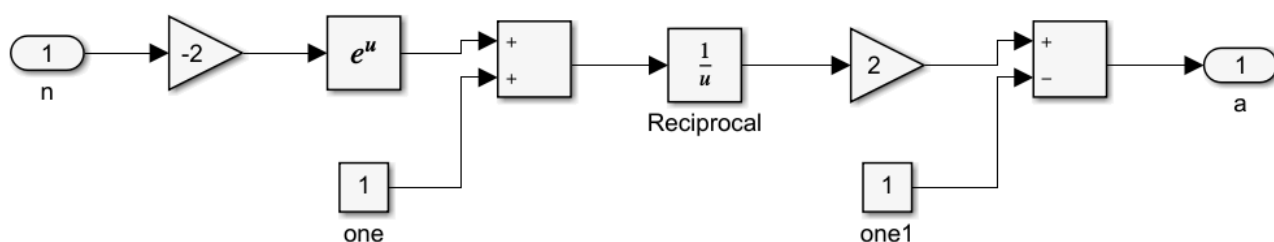


Рисунок 3.4 – Модель функції активації гіперболічний тангенс для нейронів прихованого шару проєктованої ШНМ

Однією з найскладніших задач при проектуванні ПД-регулятора на основі ШНМ був процес її навчання, що передбачав використання послідовності з наборів вхідних і вихідних значень, які отримані експериментальним шляхом. На

входи ШНМ подавалась навчальні послідовності, які являють собою значення електричних параметрів ДБЖ:

- вихідна напруга U_{out} ;
- вихідний струм навантаження I_{load} ;
- струм заряду двох груп акумуляторних батарей I_{ab1}, I_{ab2} ;
- температура АБ T_{ab} .

Тому вагові коефіцієнти синтезованої штучної нейронної мережі були отримані в процесі навчання, використовуючи для цього дані з реального об'єкту. На основі вхідної послідовності нейронна мережа створювала свій набір вихідних сигналів, який порівнювався з очікуваними вихідними значеннями. Якщо була різниця між фактичним і бажаним результатом, то вагові коефіцієнти змінювались таким чином, щоб ця різниця зменшилась.

Для підвищення ефективності функціонування штучної нейронної мережі, в процесі її навчання були застосовані навчальні послідовності, які не лише відтворюють роботу джерела безперебійного живлення щодо отримання відповідних значень вихідної величини (ПД-коефіцієнтів), але і враховують його дії, що спрямовані на компенсацію випадкових впливів та збурень.

В процесі реалізації алгоритму навчання нейронної мережі для оцінювання якості процесу навчання використовувалась середньоквадратична функція похибки E (Mean Squared Error), яка підлягає мінімізації і обчислюється за формулою:

$$E = \frac{1}{N_D} \cdot \sum_{k=1}^{N_D} (x(k) - y(k))^2, \quad (3.2)$$

де, N_D – кількість прикладів у навчальній вибірці, $y(k)$ – виходи нейронної мережі, $x(k)$ – цільові значення з навчальної вибірки.

Позначимо вихід k -го нейрона вихідного шару через $O(k)$ [23]:

$$O(k) = f(net_k),$$

де $f()$ – функція активації нейрона, net_k – вихідний сигнал ШНМ для k -го нейрона, який визначається за формулою:

$$net_k = \sum_j w_{kj} O_j + \theta_k.$$

де w_{kj} – ваговий коефіцієнт з'єднання j -го нейрона з k -м, O_j – вхідний сигнал j -го нейрона, θ_k – порогова величина для вихідного шару ШНМ,

Через те, що значення ПД-коефіцієнтів не обмежуються діапазоном від 0 до 1, то після виходу мережі $O'(k)$ було використано коефіцієнт передачі c , такий, що

$$O'(k) = c \cdot f(net_k), \quad c > 0.$$

В якості навчального методу для нейронної мережі обрано алгоритм найшвидшого спуску, відповідно до якого вагові коефіцієнти вихідного шару визначаються як:

$$\Delta w_{kj}(t+1) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{kj}} + \alpha \Delta w_{kj}(t),$$

а для прихованого шару

$$\Delta w_{ji}(t+1) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} + \alpha \Delta w_{ji}(t),$$

де η – параметр, що визначає швидкість і стійкість процесу навчання ($\eta > 0$), α – константа, яка визначає вплив попередньої зміни вагових коефіцієнтів на поточний напрямок руху в просторі зв'язків між нейронами.

Змінна δ_k , яка визначає величину узагальненого сигналу помилки, розраховується за формулою:

$$\delta_k = -\frac{\partial E}{\partial net_k},$$

Використовуючи градієнтний метод, отримуємо:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{kj}} = \frac{\partial E}{\partial net_k} \cdot \frac{\partial net_k}{\partial w_{kj}} = \frac{\partial E}{\partial net_k} O_j$$

і

$$\delta_k = \frac{\partial E}{\partial net_k} = \frac{\partial E}{\partial y(t+1)} \cdot \frac{\partial y(t+1)}{\partial u(t)} \cdot \frac{\partial u(t)}{\partial O(k)} \cdot \frac{\partial O(k)}{\partial net_k}.$$

З врахуванням того, що

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial y(t+1)} &= \frac{\partial E}{\partial e(t+1)} \cdot \frac{\partial e(t+1)}{\partial y(t+1)} = -(x(t+1) - y(t+1)) = -e(t+1), \\ \frac{\partial O(t)}{\partial net_k} &= f'(net_k) = O(k)(1 - O(k)), \end{aligned}$$

Враховуючи те, що $O(1) = K_p$, $O(2) = K_i$ і $O(3) = K_D$, отримуємо вираз:

$$\frac{\partial u(t)}{\partial O(k)} = \begin{cases} e(t) - e(t-1) & ; k = 1 \\ e(t) & ; k = 2 \\ e(t) - 2e(t-1) + e(t-2) & ; k = 3 \end{cases}$$

Таким чином, одержимо формулу для розрахунку приросту вагових коефіцієнтів вихідного шару ШНМ:

$$\Delta w_{kj}(t+1) = -\eta \delta_k O_j + \alpha \Delta w_{kj}(t),$$

$$\delta_k = e(t+1) \frac{\partial y(t+1)}{\partial u(t)} O(k)(1-O(k)) \frac{\partial u(t)}{\partial O(k)}.$$

Для прихованого шару отримаємо вираз:

$$\frac{\partial E}{\partial net_j} = \sum_k \frac{\partial E}{\partial net_k} \cdot \frac{\partial net_k}{\partial O_j} \cdot \frac{\partial O_j}{\partial net_j} = \sum_k \delta_k w_{kj} f'(net_j) = - \sum_k \delta_k w_{kj} O_j (1 - O_j).$$

У результаті було отримане правило знаходження приросту вагових коефіцієнтів прихованого шару для кожного наступного кроку навчання:

$$\begin{aligned} \Delta w_{ji}(t+1) &= -\eta \delta_j O_i + \alpha \Delta w_{ji}(t), \\ \delta_j &= \frac{\partial E}{\partial net_j} = \sum_k \delta_k w_{kj} O_j (1 - O_j). \end{aligned}$$

В якості навчальної послідовності були використані значення електричних параметрів ДБЖ (U_{out} , I_{load} , I_{ab1} , I_{ab2} , T_{ab}), які зберігались в енергонезалежній пам'яті центрального керуючого модуля з певною періодичністю. ПД-коефіцієнти також зберігалися в flash-пам'яті мікроконтролера та підбиралися експериментально в залежності від типу АБ та конфігурації ДБЖ. Ця інформація передавалася в персональний комп'ютер через послідовний порт за допомогою розробленого спеціалізованого програмного забезпечення, в якому передбачена можливість її експорту в окремий файл в табличному форматі. В подальшому дані з цього файлу імпортувалися в середовище ППП Matlab Neural Network Toolbox і використовувалися для навчання синтезованої ШНМ. Як видно з рис. 3.5, для навчання запропонованої ШНМ достатньо було 43 епох.

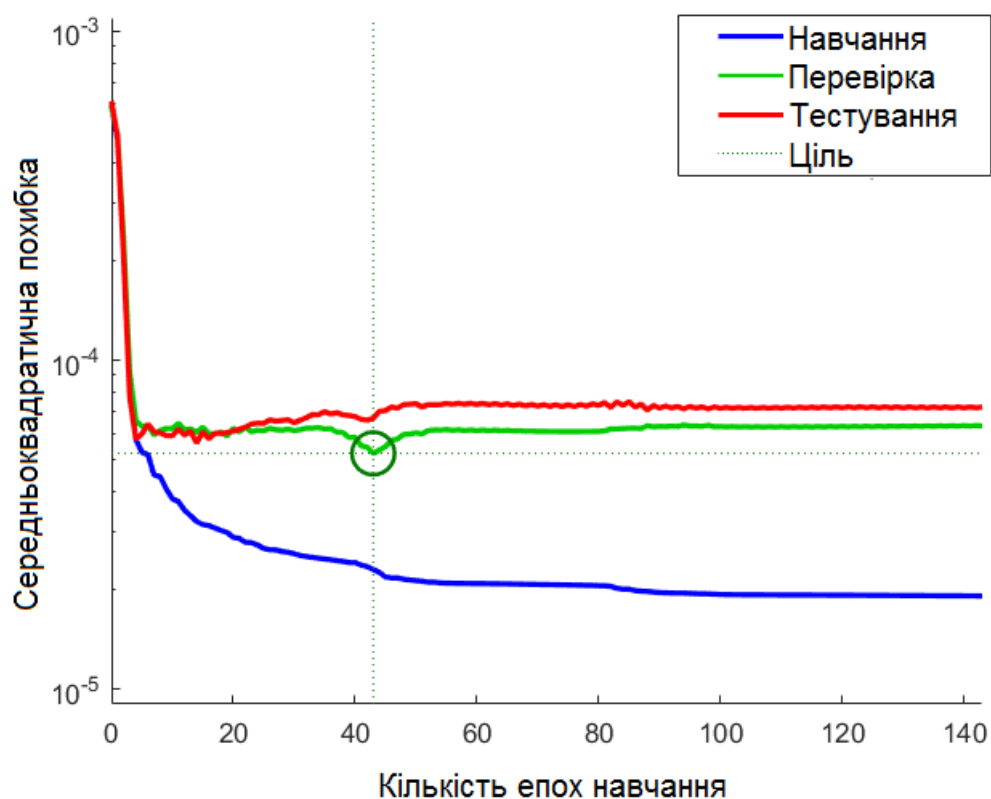


Рисунок 3.5 – Графік залежності середньоквадратичної похибки від кількості епох навчання штучної нейронної мережі

Програма дистанційного моніторингу джерела безперебійного живлення з графічною візуалізацією вихідних сигналів, яка була розроблена в межах дисертаційного дослідження, дала можливість оцінити якість налаштувань ПІД-коефіцієнтів контролера управління. На рис. 3.6 показані порівняльні результати регулювання струму заряду АБ в момент подачі вхідної напруги живлення ДБЖ ПІД-регулятором (криві 1, 3) та запропонованим методом адаптивного вибору ПІД-коефіцієнтів з використанням ШНМ (криві 2, 4).

З графіка видно, що помилка регулювання струму заряду АБ I_{ab} незначна, як для оптимізованого ПІД-регулятора (крива 1), так і для адаптивного регулятора на базі ШНМ (крива 2). Проте, при зміні налаштувань параметрів акумуляторних батарей ДБЖ ПІД-регулятор демонструє значно більшу помилку регулювання (крива 3) порівняно з адаптивним регулятором на основі ШНМ (крива 4).

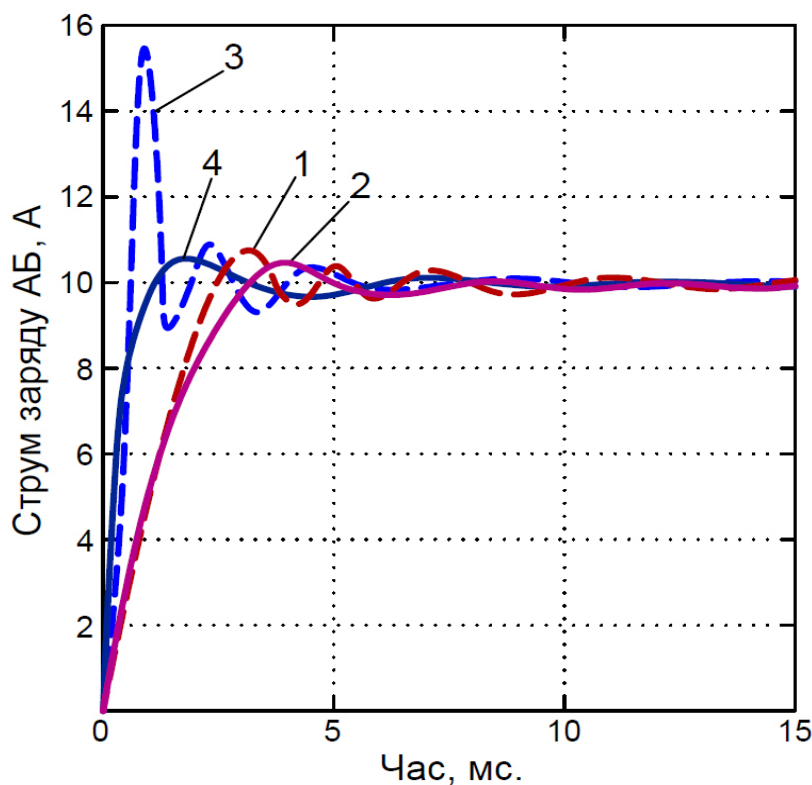


Рисунок 3.6 – Перехідні процеси при регулюванні струму заряду АБ з використанням: 1, 3 – ПД-регулятора; 2, 4 – нейронної мережі

В результаті проведеного дослідження було виявлено, що запропонована ШНМ прямої передачі сигналів із достатньою точністю дозволяє отримувати оптимальні значення ПД-коефіцієнтів. Отже, застосування штучних нейронних мереж в управлінні системою безперебійного живлення дозволило отримати ефективніші результати регулювання переходних процесів для підтримки стабільного струму заряду АБ при зміні параметрів налаштувань та в умовах стохастичної зміни навантаження.

Порівняльний аналіз даних отриманих в результаті моделювання розглянутих способів керування випрямляючими модулями ДБЖ дозволяє сформулювати такий висновок: регулятор, побудований на основі запропонованої ШНМ адаптується до зміни параметрів керованого об'єкта, тоді як, при використанні в контурі керування ПД-регулятора, якість регулювання залежить від динаміки зміни вхідного сигналу. Використання ШНМ в колі керування дає перевагу перед традиційними системами ще й тому, що для

реалізації системи управління не потрібен точний математичний опис об'єкту керування.

Результати експериментальних досліджень синтезованої ШНМ показали, що вона забезпечує вищу якість регулювання струму заряду АБ порівняно з запрограмованими алгоритмами, але це залежить, перш за все, від якості та кількості навчальних даних. Вирішення цієї задачі дисертаційного дослідження з використанням апарату ШНМ стало можливим завдяки застосуванню репрезентативного набору навчальних послідовностей, одержаних експериментальним шляхом.

3.3 Застосування нейромережевих технологій для задачі прогнозування споживання електроенергії

При застосуванні ДБЖ важливо здійснювати дистанційний моніторинг їх стану та електричних параметрів для того, щоб вчасно проводити діагностику з метою виявлення передаварійного стану, вчасної заміни акумуляторних батарей і т. д. Існуючі методи спостереження за станом та параметрами ДБЖ дозволяють з високою ефективністю здійснювати аналіз даних, отриманих в процесі моніторингу в режимі реального часу.

Для своєчасного реагування на нештатні, аварійні ситуації система керування ДБЖ повинна виробляти відповідні управлінські рішення. Враховуючи складну структуру системи безперебійного живлення, кількість функцій та підсистем, а також їх взаємодію, керуючі сигнали та управляючі рішення на різних рівнях часто є неефективними та несвоєчасними.

Задача керування компонентами джерела безперебійного живлення характеризується такими факторами:

- випадковим характером (стохастичністю) зміни навантаження;
- частою зміною структури системи (підключення / відключення випрямляючих модулів, акумуляторних батарей і т.д.).

Традиційні методи керування компонентами системи безперебійного живлення не враховують в повній мірі динаміку процесів, які відбуваються, і, як правило, генерують керуючі впливи тоді, коли проблемні чи аварійні ситуації вже виникли. Часто, обслуговуючі організації вручну виконують такі процедури:

- зміна конфігурації системи (збільшення кількості випрямляючих модулів для нарощування вихідної потужності ДБЖ);
- прийняття рішення про заміну акумуляторних батарей;
- виїзд ремонтної бригади для заміни несправних модулів.

Як правило, реактивний підхід до керування компонентами джерела безперебійного живлення не здатен забезпечити високий рівень сервісу, який полягає у підтримці коефіцієнта готовності системи на високому рівні. На даний час все більшої актуальності набуває активний підхід до процесу керування компонентами системи безперебійного живлення, в основі якого лежать методи прогнозування.

Для управління багатьма сучасними електронними пристроями використовується метод прогнозного керування, який базується на знаннях про динамічні характеристики об'єкта [143]. Основною особливістю цього методу є використання моделі для прогнозування поведінки контрольованих параметрів в майбутньому. Контролер використовує цю інформацію для забезпечення оптимального режиму керування відповідно до наперед визначених критеріїв оптимізації [144].

Виникає необхідність впровадження інтегрованих систем керування ДБЖ, які здатні підвищити рівень автоматизації процесу прийняття рішень щодо обслуговування та технічної підтримки ДБЖ. Тому актуальним завданням дисертаційної роботи є розробка та дослідження методів керування на основі не лише аналізу даних, які отримані в результаті моніторингу, а також з використанням прогнозування поведінки системи. Це дозволить ефективніше керувати рівнем завантаження ДБЖ за рахунок аналізу даних накопиченої статистики про споживання електроенергії за попередній період. Крім того,

реалізація функції прогнозування дасть змогу забезпечити кращу реакцію на виникнення критичних ситуацій, до яких відносяться відмови окремих модулів і підсистем, перевантаженість системи, різка зміна рівня споживання електроенергії тощо.

Необхідність прогнозування потреби в енергетичних ресурсах на середньострокову та короткострокову перспективу пов'язана зі знаходженням компромісу між потребою забезпечити високі показники надійності ДБЖ шляхом резервування його компонентів та потребою досягнення високої енергоефективності шляхом підвищення рівня завантаженості випрямляючих модулів та збільшення, таким чином, їхнього ККД. Це стане можливим завдяки прийняттю випереджаючих рішень щодо підключення або відключення необхідної кількості випрямляючих модулів, що дасть змогу запобігти появі проблем недостатнього рівня завантаженості випрямлячів та їх надмірного завантаження.

Отримуючи прогнозовані дані щодо ймовірності можливого виникнення аварійних ситуацій в загальній електромережі, та про випадки переключення обладнання на живлення від акумуляторних батарей, можна передбачити закінчення їхнього робочого циклу. Це дасть змогу вчасно провести заміну АБ підтримуючи коефіцієнт готовності ДБЖ на високому рівні.

Для досягнення цієї мети потрібно розробити математичне і алгоритмічне забезпечення системи керування та моніторингу на основі інтелектуальних технологій аналізу даних та прогнозування поведінки системи. Тому, актуальною задачею є розроблення підсистеми керування ДБЖ на основі адаптивного підходу та з врахуванням прогнозу навантаження на компоненти системи безперебійного живлення, що дасть змогу точніше підібрати потрібну кількість випрямляючих модулів, яка необхідна для живлення споживачів в конкретний момент часу.

На роботу як ДБЖ, так і телекомунікаційного обладнання, впливає велика кількість випадкових факторів, як внутрішніх, так і зовнішніх. Проблема

прогнозування навантаження на джерела безперебійного живлення, які живлять телекомунікаційне обладнання, пов'язана з тим, що потреба в електроенергії може змінюватися в широких межах внаслідок стохастичної зміни кількості підключених абонентів та клієнтських запитів. Тому, в процесі прогнозування необхідно здійснювати адаптацію до різних ситуацій і умов, вибираючи оптимальний алгоритм прогнозування.

Одним з найперспективніших методів вирішення завдання прогнозування споживання електроенергії телекомунікаційним обладнанням, яке живиться від ДБЖ є використання штучних нейронних мереж, які, завдяки можливостям самонавчання та узагальнення накопичених знань, демонструють високу ефективність при вирішенні подібних завдань. ШНМ володіють такими характеристиками, як адаптивність та здатність до навчання, що робить їх ефективним інструментом при використанні в задачах прогнозування споживання електроенергії.

В даній дисертаційній роботі розглядаються підходи до застосування апарату ШНМ для задач прогнозування в системі електропостачання з застосуванням модульних джерел безперебійного живлення. Для вирішення цього завдання необхідно було забезпечити швидкий та ефективний процес опрацювання не лише поточних даних, але і раніше накопичених з метою формування навчальної послідовності.

Для реалізації запропонованого рішення використана енергонезалежна пам'ять ЦКМ. Дані, отримані в результаті моніторингу, зберігалися в пам'яті з певною періодичністю, а також при різкому відхиленні важливих параметрів від норми. Крім того, поточні та накопичені дані надсилалися в ПК за допомогою інтернет з'єднання де зберігалися в базі даних. ПЗ оператора структурувало отриману інформацію та здійснювало її обробку. Отримані дані використовувалися у якості вхідних сигналів навчальної послідовності для штучної нейронної мережі.

3.4 Синтез ШНМ для короткострокового прогнозування електроспоживання обладнанням, яке живиться від ДБЖ

Процес розробки адаптивної системи на основі нейронних мереж включав в себе синтез ШНМ та її навчання, під час якого змінювались вагові коефіцієнти нейронів в різних шарах.

Структура ШНМ була обрана відповідно до складності та особливостей задачі прогнозування, яку потрібно було вирішити в межах задачі дисертаційного дослідження. При цьому було взято до уваги декілька важливих принципів, зокрема те, що зі збільшенням кількості нейронів, шарів і щільності зв'язків між ними зростають можливості ШНМ. Крім того, використання зворотних зв'язків підвищує динамічну стійкість ШНМ. З цих міркувань для реалізації задачі прогнозування, було обрано рекурентну нейронну мережу Елмана (рис. 3.7), важливою особливістю якої є можливість запам'ятовування послідовностей. Основною перевагою ШНМ цього типу є можливість самоорганізації в результаті навчання. Вона володіє універсальними екстраполюючими та апроксимуючими властивостями та здатністю до навчання в умовах параметричної та структурної невизначеності прогнозованих процесів [141].

ШНМ Елмана формується з багатошарового перцептрона з додаванням зворотних зв'язків, які йдуть від виходів внутрішніх нейронів на додаткові входи проміжного шару, що робить її значно стійкішою в порівнянні з іншими рекурентними мережами. ШНМ Елмана відрізняється від нейронних мереж прямого поширення тим, що має можливість застосовувати елементи внутрішньої пам'яті для обробки будь-яких послідовностей вхідних сигналів. Для проміжного шару проектованої ШНМ було обрано функцію активації – гіперболічний тангенс, а для вихідного шару – лінійну функцію.

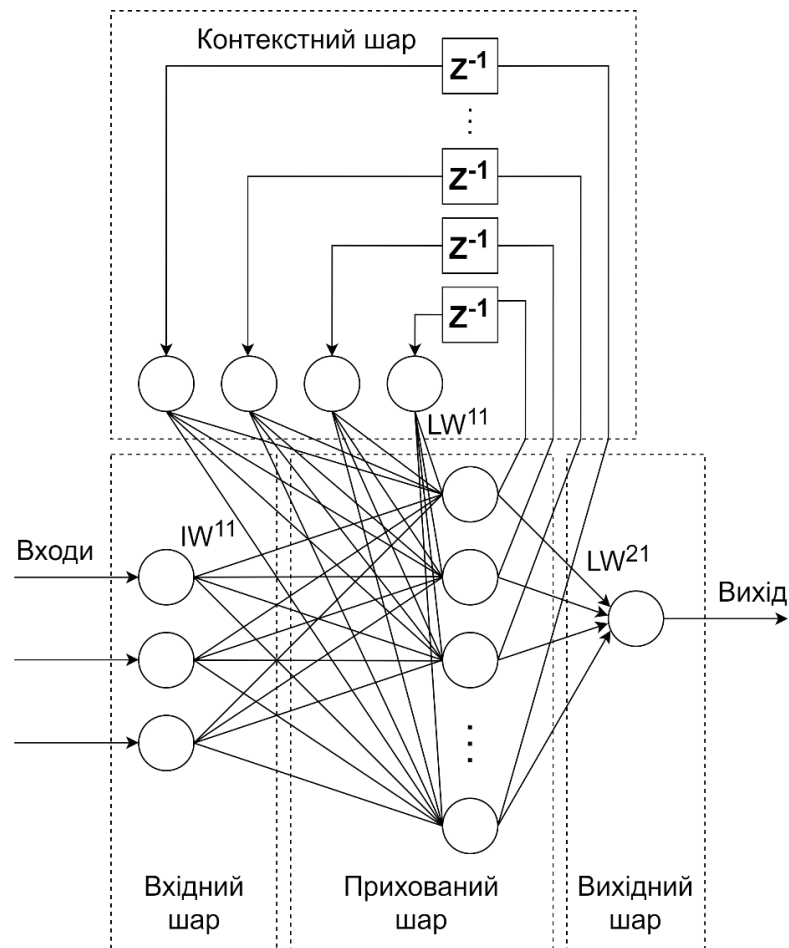


Рисунок 3.7 – Структура ШНМ Елмана

Після вибору архітектури ШНМ була виконана оцінка необхідної кількості нейронів у прихованому шарі. Для цього використані формули (3.3) і (3.4) для оцінки кількості синаптичних вагових коефіцієнтів LW [145]:

$$\frac{n \cdot N}{1 + \log_2 N} \leq LW \leq m \cdot \left(\frac{N}{m} + 1 \right) \cdot (m + n + 1) + m, \quad (3.3)$$

$$2 \cdot (L + m + n) \leq N \leq 10 \cdot (L + m + n), \quad (3.4)$$

де n та m – розмірності відповідно вхідного та вихідного сигналів, N – кількість елементів навчальної вибірки, L – кількість нейронів.

Здійснивши оцінку вагових коефіцієнтів, був проведений розрахунок кількості нейронів у прихованому шарі за формулою:

$$L = \frac{LW}{m + n}$$

Для синтезу ШНМ Елмана, структура якої зображена на рис. 3.8, було використано інструмент NeuralNetworkToolbox середовища ППП Matlab.

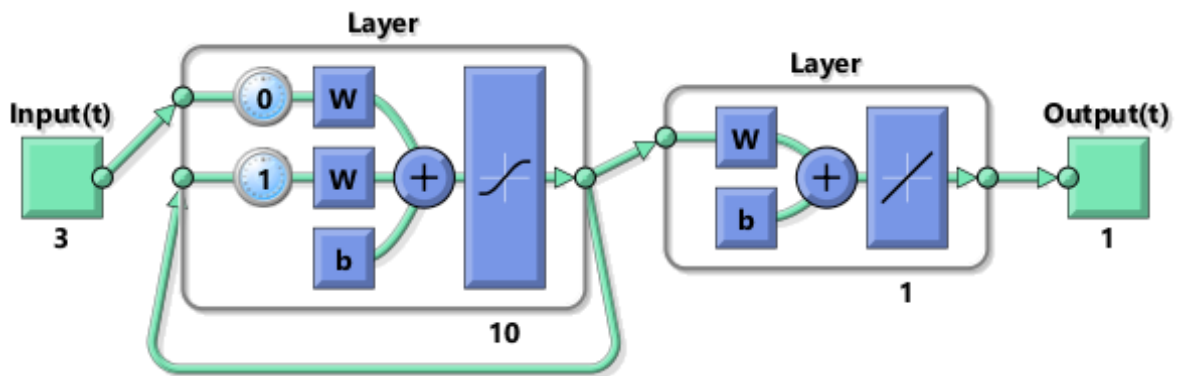


Рисунок 3.8 – Модель ШНМ Елмана, яка синтезована в Neural Network Toolbox

Після вибору структури ШНМ проведено її навчання з метою знаходження оптимальних значень вагових коефіцієнтів. Навчання ШНМ здійснене з використанням алгоритму зворотного розповсюдження помилки методом «навчання з вчителем», який передбачає прямий і зворотній проходи по всіх шарах. Цей метод вимагає наявності навчальних даних, які необхідно подати на входи нейронної мережі. На рис. 3.9 показані етапи навчання штучної нейронної мережі з використанням цього методу.

Процес навчання ШНМ здійснений з використанням експериментальних даних. Для цього на вхід нейронної мережі послідовно подавалися усі елементи навчальної послідовності, яка представляє собою значення рівня споживання електроенергії телекомунікаційним обладнанням, яке живиться від ДБЖ впродовж місяця. Дані щогодини вимірювались та зберігались в енергонезалежній пам'яті центрального керуючого модуля з подальшою передачею накопиченого архіву в ПК оператора за допомогою програми дистанційного моніторингу.

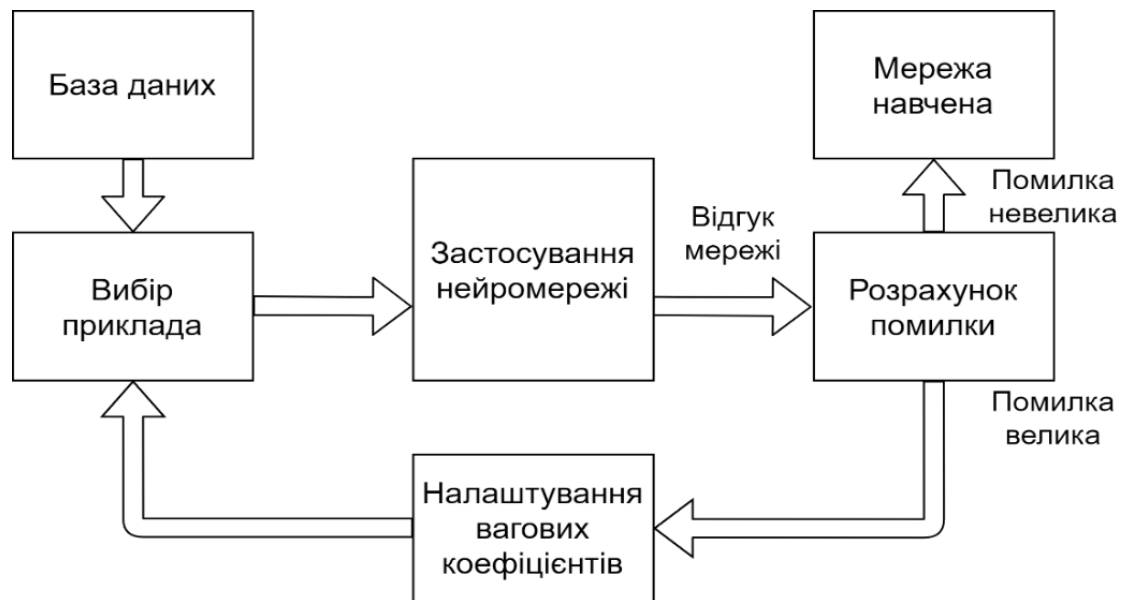


Рисунок 3.9 – Процес навчання штучної нейронної мережі методом зворотного розповсюдження помилки

На входи ШНМ Елмана подавалась навчальні послідовності, які являють собою значення електричних параметрів ДБЖ:

- значення споживаної потужності ДБЖ P_{cons} , яке розраховується за формулою (2.2);
- температура АБ T_{ab} ;
- числове значення дати і часу моменту фіксації попередніх величин.

Для навчання ШНМ було обрано алгоритм Байєсівської регуляризації, який реалізований засобами Neural Network Toolbox ППП Matlab. Під час цього процесу обраховувались вихідні значення ШНМ, які порівнювались з очікуваними. В результаті порівняння розраховувалась помилка, значення якої використовувалось для зміни вагових коефіцієнтів. Цей процес повторювався впродовж певної кількості епох до тих пір поки помилка навчання не досягнула мінімального значення. Навчальна послідовність вхідних даних була розділена на три частини: навчальну, контрольну і тестову. Набір вхідних даних ШНМ у кількості 1440 значень забезпечив репрезентативність навчальної вибірки. Синтезована ШНМ навчилась за 368 епох, при цьому середньоквадратична похибка становила 0,060732 (рис. 3.10).

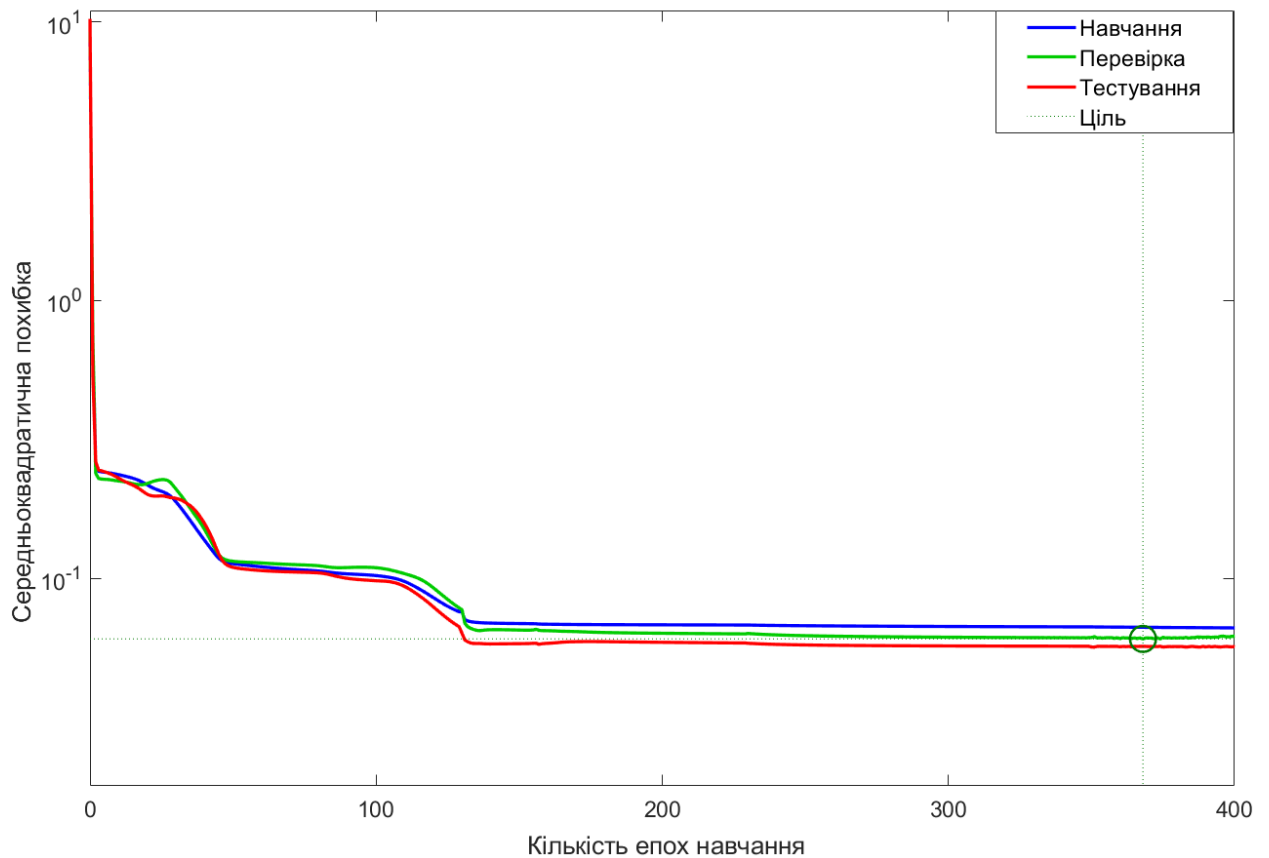


Рисунок 3.10 – Графік залежності середньоквадратичної похибки від кількості епох навчання нейронної мережі Елмана

В процесі дослідження було виявлено, що для вибраної ШНМ збільшення кількості нейронів покращує ефективність навчання. Однак, якщо кількість нейронів перевищує число 10, то подальше їх збільшення не спричиняє суттєвого зниження похибки навчання і тому є недоцільним. Після навчання нейронної мережі на її вхід було подано тестову послідовність та отримано результати прогнозування (рис. 3.14а). З отриманих результатів видно, що точність прогнозування з використанням типової структури ШНМ Елмана досить низька. Було розраховано абсолютну похибку прогнозування P_{error} за формулою:

$$P_{error} = P_{fact} - P_{pred}, \quad (3.5)$$

де P_{fact} – фактичне значення рівня споживання електроенергії обладнанням, P_{pred} – прогнозоване значення.

Результати обчислення абсолютної похибки для кожного значення тестової послідовності представлено у вигляді графіка, який зображений на рис. 3.15а. Зміна алгоритму навчання та кількості нейронів не привела до суттєвого підвищення точності прогнозування. Тому було прийнято рішення внести зміни в структуру ШНМ Елмана шляхом додавання зворотних зв'язків через лінії динамічної затримки z^{-1} від виходу до вхідних нейронів, як показано на рис. 3.11.

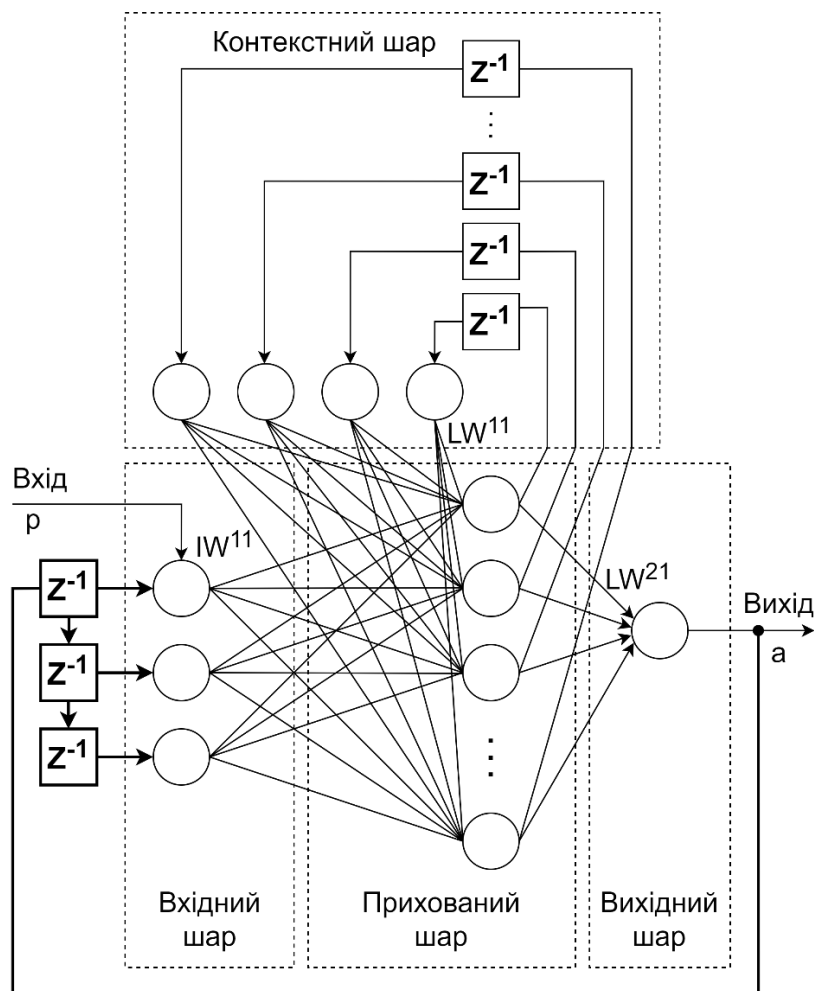


Рисунок 3.11 – Структура модифікованої ШНМ Елмана з додатковими зворотними зв'язками для прогнозування обсягу споживання електроенергії

Стан нейронів контекстного шару модифікованої ШНМ Елмана можна описати формулами:

$$\begin{cases} n^1(k) = LW^{11} \cdot a^1(k-1) + IW^{11} \cdot p + b^1, & a^1(0) = a_0^1; \\ a^1(k) = \text{tansig}(n^1(k)). \end{cases}$$

де n – виходи суматорів нейронів відповідного шару, k – часові відліки ітерацій налаштування ШНМ, a – вихід нейронів після активаційної функції у k -й ітерації, p – вектор вхідного сигналу, b – вектор зміщень, які додаються до зважених входів нейронів, IW^{11} , LW^{11} – матриці синаптичних вагових коефіцієнтів, які налаштовуються під час навчання ШНМ відповідно для вхідного вектора p та рекурентних зв'язків.

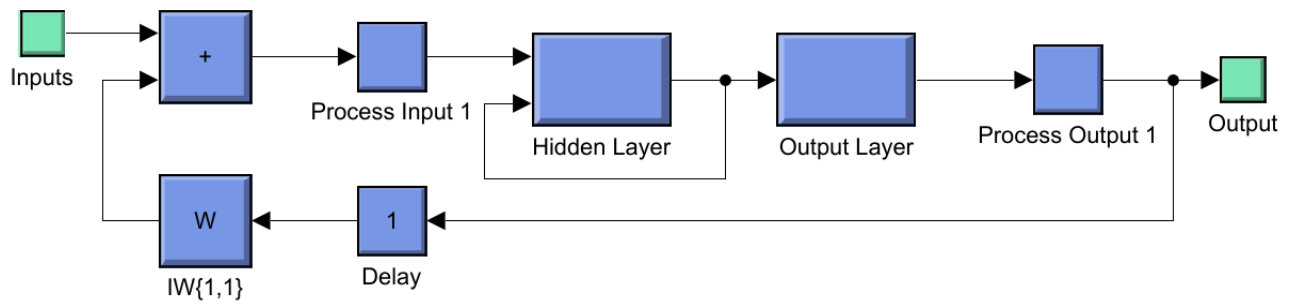
Вихідний шар ШНМ описується за допомогою формул:

$$\begin{cases} n^2(k) = LW^{21} \cdot a^1(k) + b^2; \\ a^2(k) = \text{purelin}(n^2(k)). \end{cases}$$

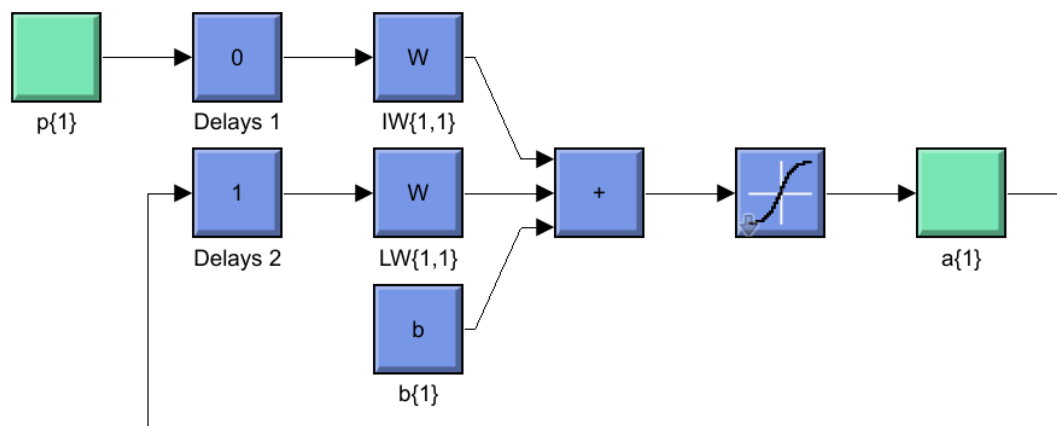
Послідовність значень вхідного сигналу розузгодження подається на лінію зворотного зв'язку із затримкою, яка містить $N-1$ блоків запізнення z^{-1} . Виходи лінії затримки формуються із вхідних значень в моменти часу $k, k-1, \dots, k-N-1$ і описуються формулою:

$$a(k) = \sum_{i=1}^k w_{1i} \cdot a(k-i+1) + b.$$

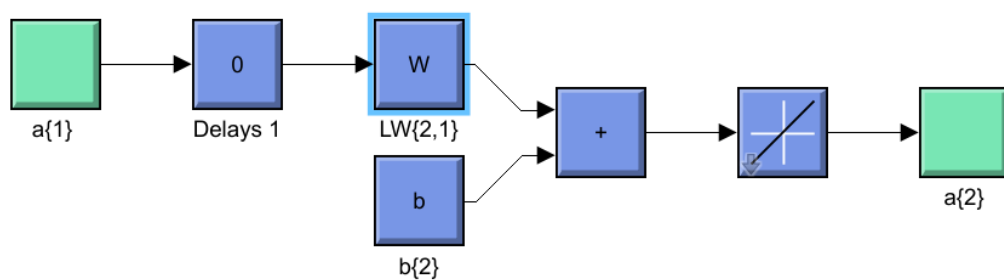
Запропоновану модифіковану ШНМ Елмана з додатковими зворотними зв'язками було синтезовано засобами Neural Network Toolbox (рис. 3.12-3.13).



а)



б)



в)

Рисунок 3.12 – Модель модифікованої ШНМ Елмана з додатковими зворотними зв'язками, яка синтезована в Neural Network Toolbox: а) загальна структура; б) модель прихованого шару; в) модель вихідного шару

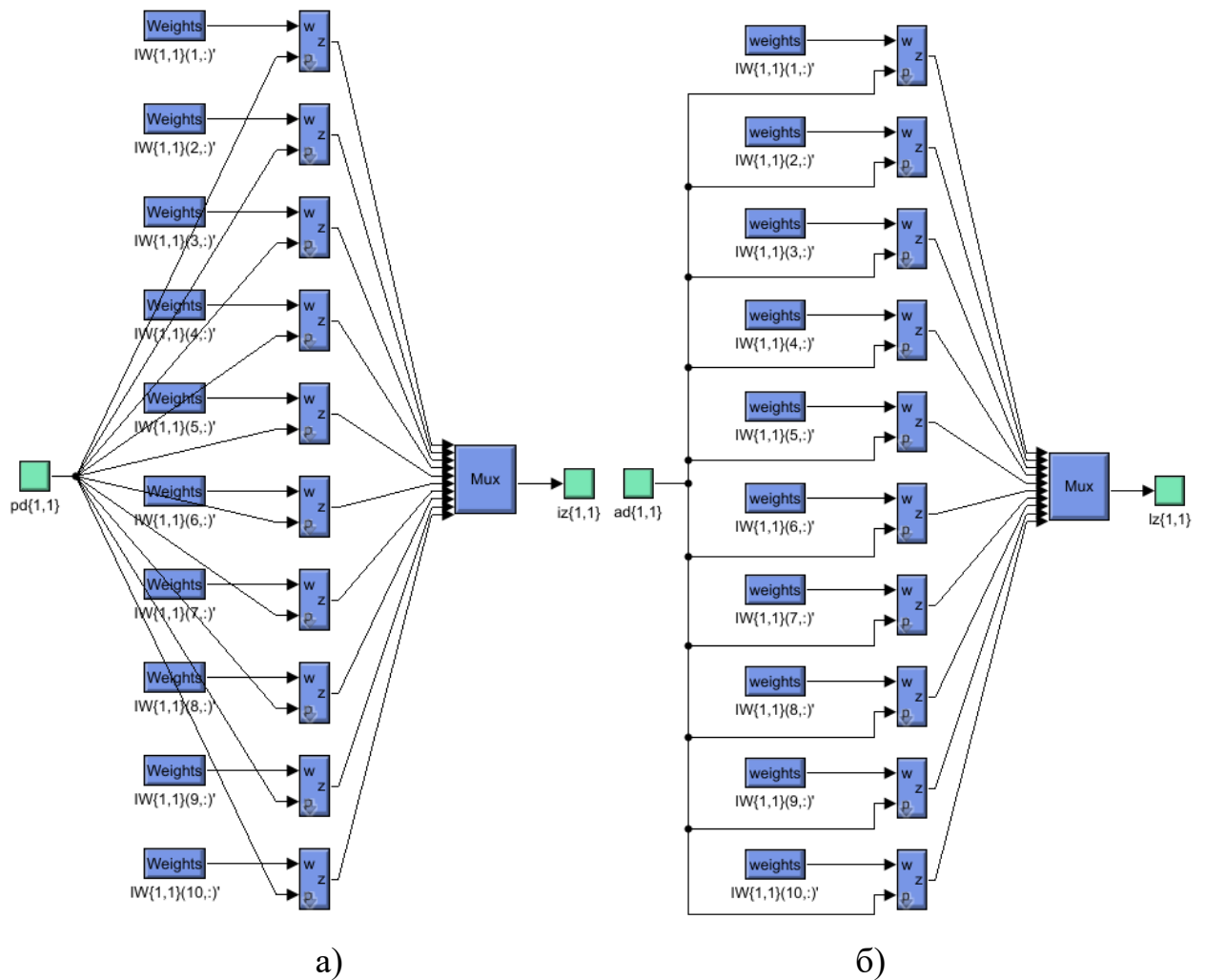


Рисунок 3.13 – Модель прихованого шару модифікованої ШНМ Елмана з 10 нейронами і ваговими коефіцієнтами: а) вхідного шару, б) контекстного шару

Результати роботи запропонованої ШНМ Елмана з додатковими зворотними зв'язками показали значно кращі результати прогнозування, які можна побачити на рис. 3.14б. З рис. 3.15б видно, що абсолютна похибка прогнозування, яка розрахована за формулою (3.5) є значно меншою для більшості значень тестової послідовності.

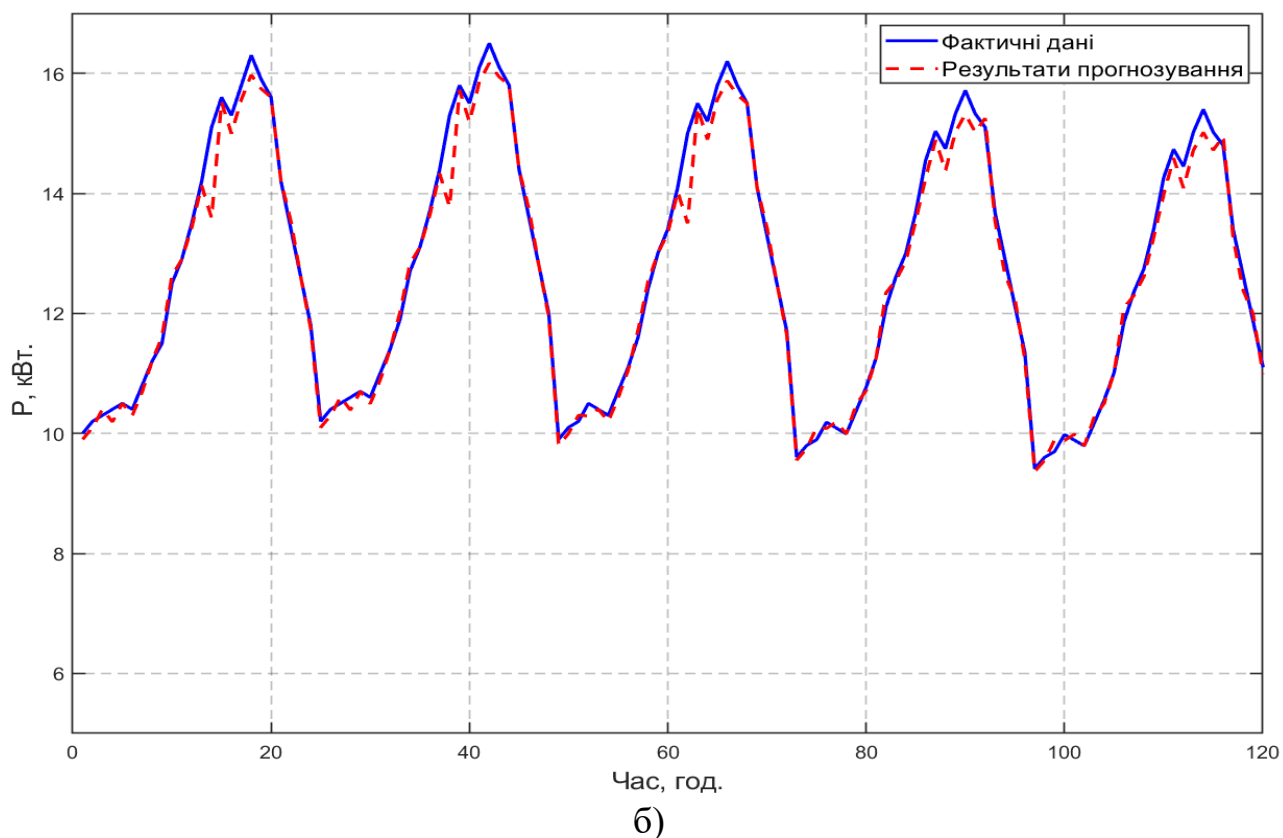
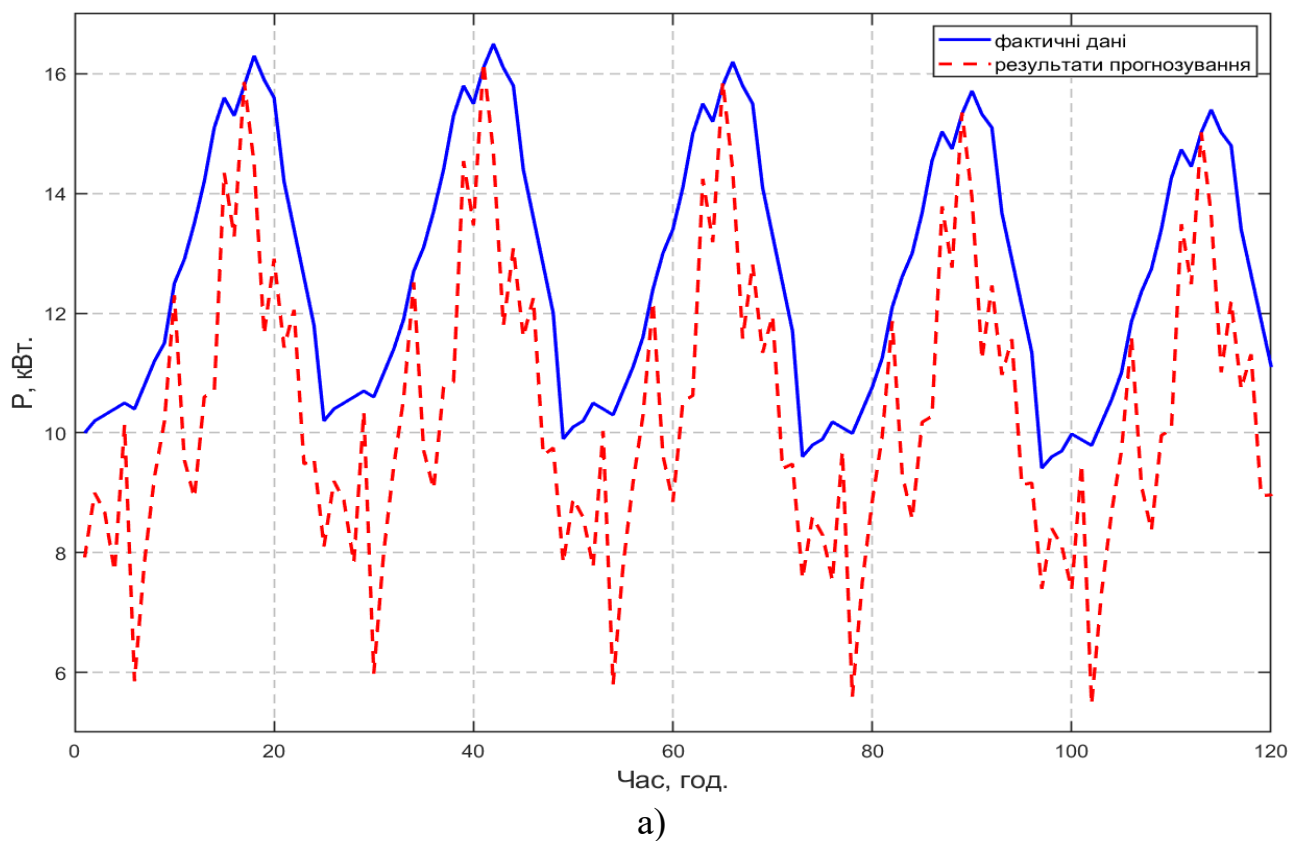
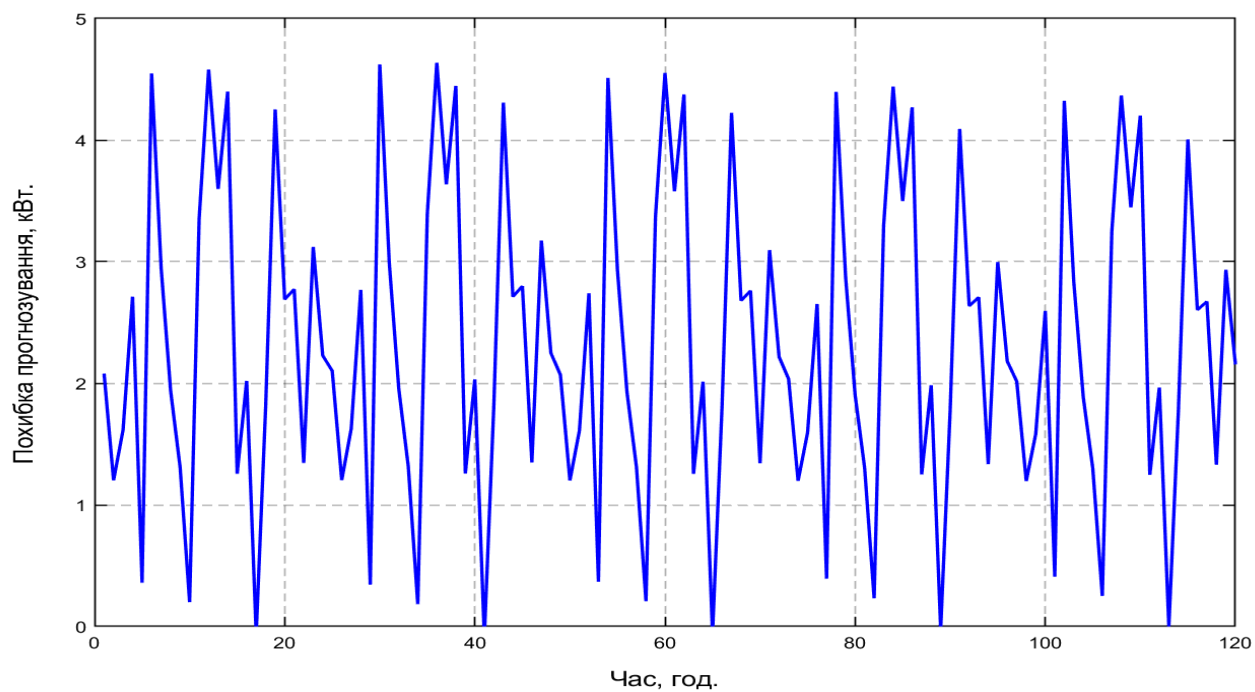
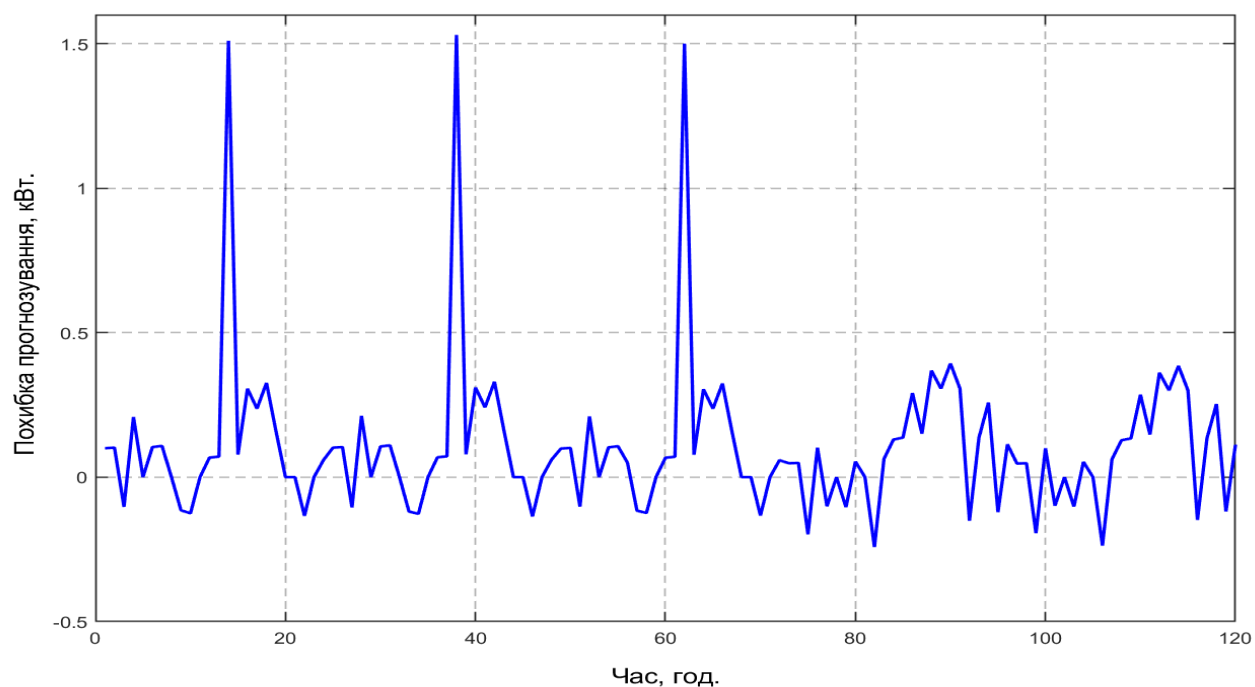


Рисунок 3.14 – Результати прогнозування споживання електроенергії обладнанням, яке живиться від ДБЖ з застосуванням: а) типової ШНМ Елмана; б) модифікованої ШНМ Елмана з додатковими зворотними зв'язками

На рис. 3.15 показана графік зміни абсолютної похибки прогнозування споживання електроенергії телекомунікаційним обладнанням, яке живиться від джерела безперебійного живлення.



а)



б)

Рисунок 3.15 – Похибка прогнозування споживання електроенергії обладнанням, яке живиться від ДБЖ з застосуванням: а) типової ШНМ Елмана; б) модифікованої ШНМ Елмана з додатковими зворотними зв'язками

З результатів моделювання можна зробити висновок, що запропонована рекурентна нейронна мережа на базі ШНМ Елмана з додатковими зворотними зв'язками краще підходить для задачі короткострокового прогнозування рівня споживання електроенергії.

Важливим є те, що отримання результатів прогнозування відбувається оперативно, що дозволяє системі управління компонентами ДБЖ враховувати їх для підвищення якості прийнятих керуючих рішень, які стосуються ввімкнення чи вимкнення випрямляючих модулів, заміни акумуляторних батарей тощо.

3.5 Висновки до розділу 3

Результати роботи над третім розділом дисертації дозволили сформулювати такі висновки:

1. Обґрунтовано доцільність застосування штучних нейронних мереж для задачі керування процесом регулювання струму заряду АБ в джерелах безперебійного живлення. Проаналізовано особливості синтезу та методи навчання штучної нейронної мережі.

2. Розроблено підсистему керування ДБЖ для покращення режимів регулювання заряду / розряду АБ. Синтезовано контролер з застосуванням ШНМ для підвищення ефективності керування процесом регулювання струму заряду АБ. Обґрунтовано його переваги над контролерами, які побудовані з використанням класичних методів теорії автоматичного керування.

3. Удосконалено адаптивний метод прогнозування рівня споживання електроенергії обладнанням, яке живиться від ДБЖ, в умовах стохастичної зміни навантаження, який відрізняється від відомих застосуванням рекурентної нейронної мережі з додатковими зворотними зв'язками, що дає змогу підвищити точність прогнозування для реалізації ефективнішого керування компонентами системи безперебійного живлення.

Основні наукові результати, викладені в третьому розділі, опубліковані в роботах автора [12, 21, 23].

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ДЖЕРЕЛ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ

В даному розділі описаний завершальний етап дисертаційного дослідження – практична реалізація комп'ютеризованої системи для керування та моніторингу джерел безперебійного живлення. Приведено особливості розробки компонентів апаратного забезпечення комп'ютеризованої системи. Описано алгоритми функціонування та висвітлено ключові особливості реалізації програмного забезпечення на основі моделей та методів, які запропоновані у попередніх розділах дисертації. Представлено результати експериментальних досліджень роботи компонентів розробленої комп'ютеризованої системи.

4.1 Функціональне призначення комп'ютеризованої системи керування та моніторингу ДБЖ

Проектована комп'ютеризована система призначена для управління усіма процесами, які відбуваються в ДБЖ. На основі результатів огляду і порівняльного аналізу існуючих сучасних систем для керування та моніторингу ДБЖ, який наведений в першому розділі, та запропонованих методів, що представлені в другому та третьому розділах дисертаційної роботи були сформульовані базові функції проекрованої системи:

- вимірювання основних електричних параметрів ДБЖ;
- опитування стану цифрових сигналів, які вказують на наявність аварійних ситуацій;
- візуалізація вимірних даних у зручній для користувача формі;

- збереження вимірних параметрів в енергонезалежній пам'яті з можливістю накопичення значень впродовж тривалого періоду;
- обмін інформацією з програмою дистанційного моніторингу, встановленою на ПК, для її відображення та збереження в базі даних з можливістю подальшої обробки та аналізу;
- реалізація методу адаптивної корекції навантаженості випрямлячів;
- реалізація методу циклічного зсуву навантажених випрямляючих модулів;
- впровадження адаптивного методу ПД-регулювання струму заряду АБ з використанням нейронних мереж;
- прогнозування рівня споживання електроенергії обладнанням, яке живиться від ДБЖ.

Комплексний аналіз приведених вище базових функцій показав, що доцільно застосувати метод структурно-алгоритмічного синтезу для їх реалізації. В загальному випадку, окреслене завдання розробки комп'ютеризованої системи керування та моніторингу ДБЖ можна зобразити у вигляді загальної схеми для вирішення задачі реалізації апаратно-програмного забезпечення, яка зводиться до таких етапів:

1. Розроблення узагальненої структури комп'ютеризованої системи;
2. Розроблення апаратного забезпечення системи;
3. Розроблення програмного забезпечення для реалізації усіх функцій проектованої системи.

У наступних підрозділах дисертації буде описана реалізація окреслених етапів розробки комп'ютеризованої системи керування та моніторингу ДБЖ.

4.2 Структура комп'ютеризованої системи керування та моніторингу джерел безперебійного живлення

Результати досліджень, які були проведені у другому та третьому розділах дисертації, стали основою для синтезу структури та алгоритмів роботи комп'ютеризованої системи керування та моніторингу ДБЖ. В загальному проєктована система включає в себе два види забезпечення: апаратне і програмне. Узагальнена структура цієї системи зображена на рис. 4.1.

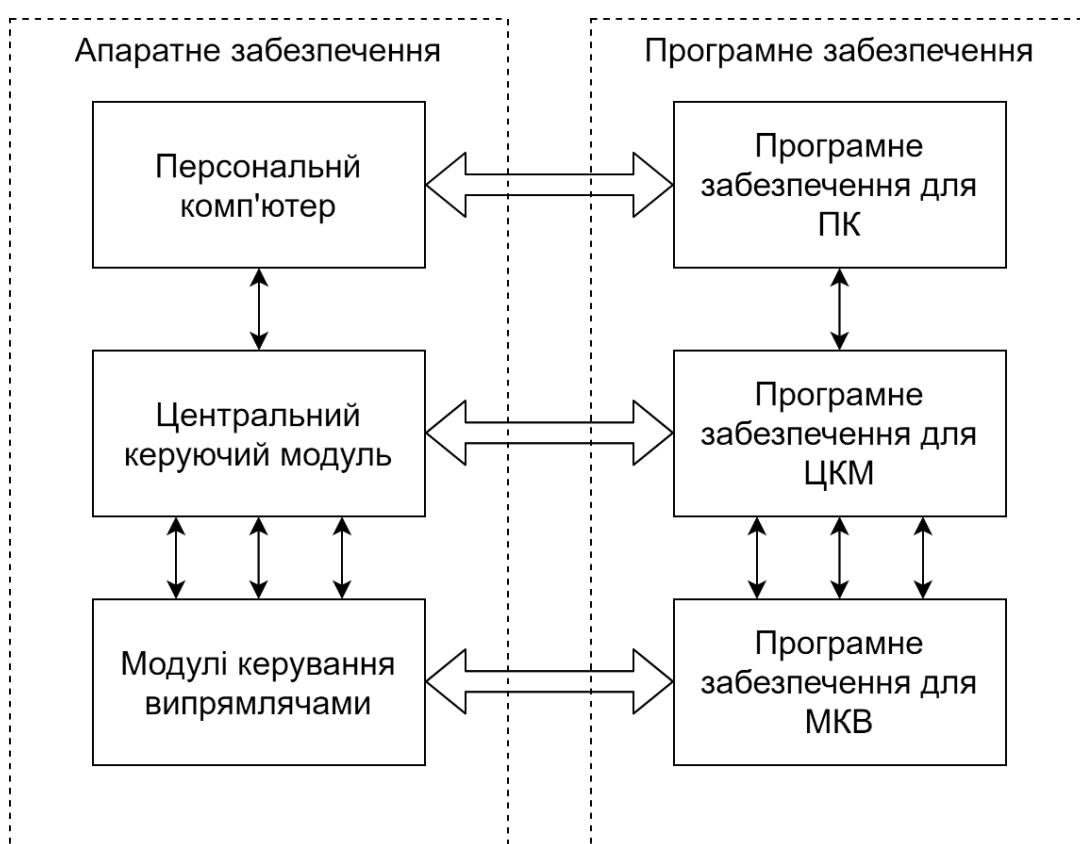


Рисунок 4.1 – Загальна структура комп'ютеризованої системи для керування та моніторингу ДБЖ

Для ефективного використання компонентів системи безперебійного живлення та досягнення високих показників надійності та енергоефективності, запропонована структурно-функціональна модель системи керування та моніторингу ДБЖ, що включає в себе компоненти, які з'єднані між собою інформаційними та електричними каналами: силові модулі, датчики, контролери,

ПК оператора (рис. 4.2). Розроблена модель складається з трьох рівнів. Вона створена з використанням сучасних принципів керування складними ієрархічними електротехнічними комплексами.

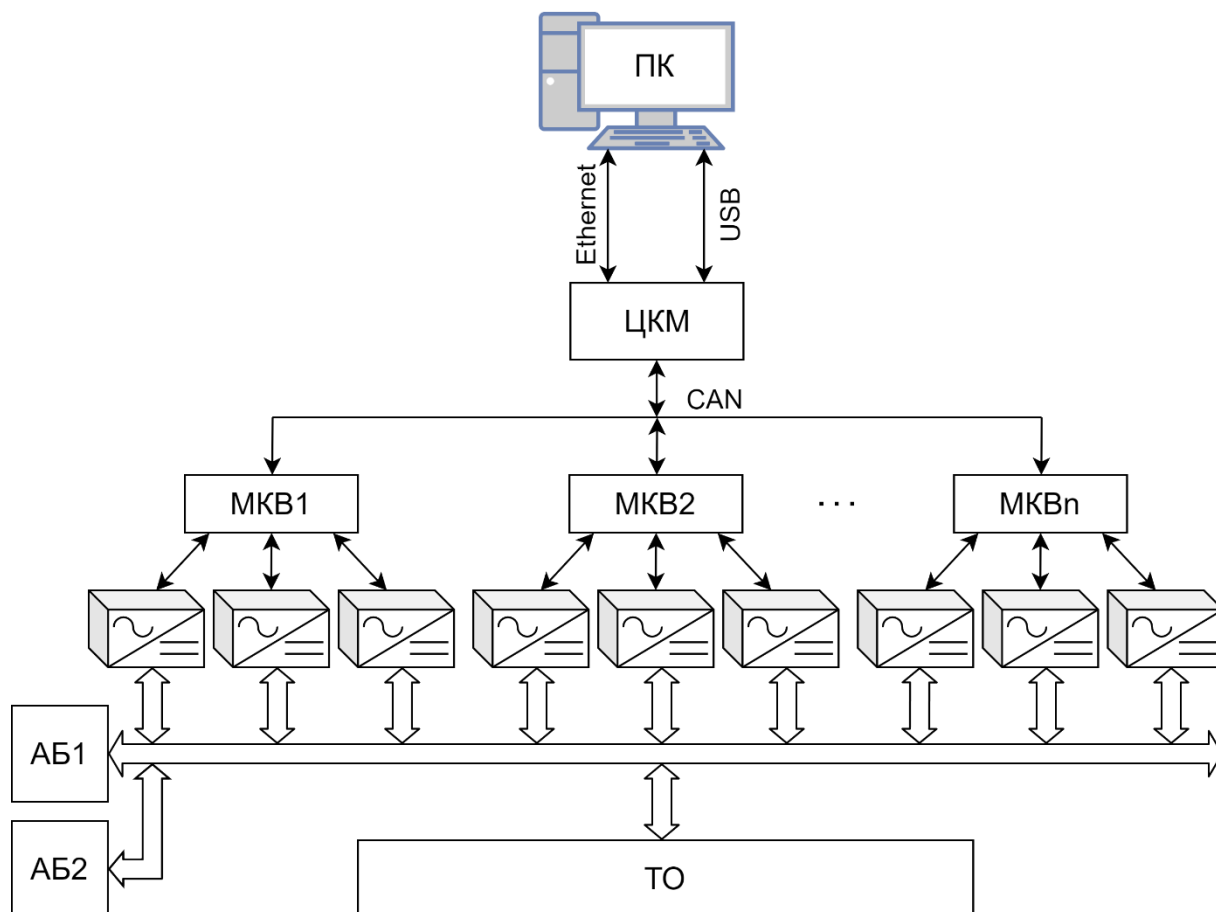


Рисунок 4.2 – Функціональна схема комп'ютеризованої системи

Перший рівень являє собою сукупність апаратного забезпечення у вигляді силового обладнання: випрямляючих модулів, акумуляторних батарей, автоматичних вимикачів, і т.д.

Другий рівень містить контролери та керуючі модулі (ЦКМ та МКВ), які використовуються для моніторингу, вимірювання параметрів, контролю стану, накопичення обробки та зберігання інформації, передачі на верхній рівень отриманих даних, генерації керуючих сигналів. ПЗ для МК передбачає наявність прикладного програмного інтерфейсу (API) для реалізації взаємодії компонентів комп'ютеризованої системи ДБЖ.

Центральний керуючий модуль призначений для вимірювання і відображення електричних параметрів джерела безперебійного живлення, подачі напруги керування заряду / розряду АБ, зберігання інформації про виміряні параметри та значення станів цифрових аварійних сигналів ДБЖ, забезпечення обміну інформацією з ПК через інтерфейс Ethernet та USB.

Модуль керування випрямлячами відповідає за моніторинг стану випрямляючих модулів та за управлінням процесом їх комутації (ввімкнення / вимкнення) на основі команд, отриманих від ЦКМ.

Третій рівень забезпечує інтерфейс між оператором та обладнанням ДБЖ, яке розміщене на розподілених локальних об'єктах. На цьому рівні реалізоване ПЗ для зберігання та відображення інформації про стан та параметри ДБЖ, а також для вироблення рекомендацій щодо заміни його компонентів на конкретному об'єкті.

4.3 Апаратне та схемотехнічне забезпечення компонентів комп'ютеризованої системи керування та моніторингу ДБЖ

4.3.1 Розробка апаратної частини центрального керуючого модуля ДБЖ

В представленій системі центральний керуючий модуль – це пристрій, який здійснює управління процесом функціонування ДБЖ в усіх режимах роботи, реалізуючи

для реалізації запропоновані в дисертації методи. Він призначений для виконання таких функцій:

- вимірювання і початкове опрацювання електричних параметрів ДБЖ;
- відображення виміряних значень на рідкокристалічному індикаторі;
- керування режимами роботи ДБЖ та контроль його стану;
- обмін даними з модулями керування випрямлячами;
- накопичення інформації про стан та електричні параметри системи за тривалий час в енергонезалежній пам'яті з можливістю автоматичного перезапису архіву новими даними;

- передача інформації в персональний комп'ютер в автоматичному режимі;
- отримання та виконання команд, які приходять з ПК (зміна параметрів налаштувань, вибір режиму роботи системи, калібрування вимірювальних каналів, синхронізація часу і т.п.).

З метою впровадження цих функціональних можливостей для реалізації розроблених методів (див. розділ 2), розроблено структуру центрального керуючого модуля, яку подано на рис. 4.3.

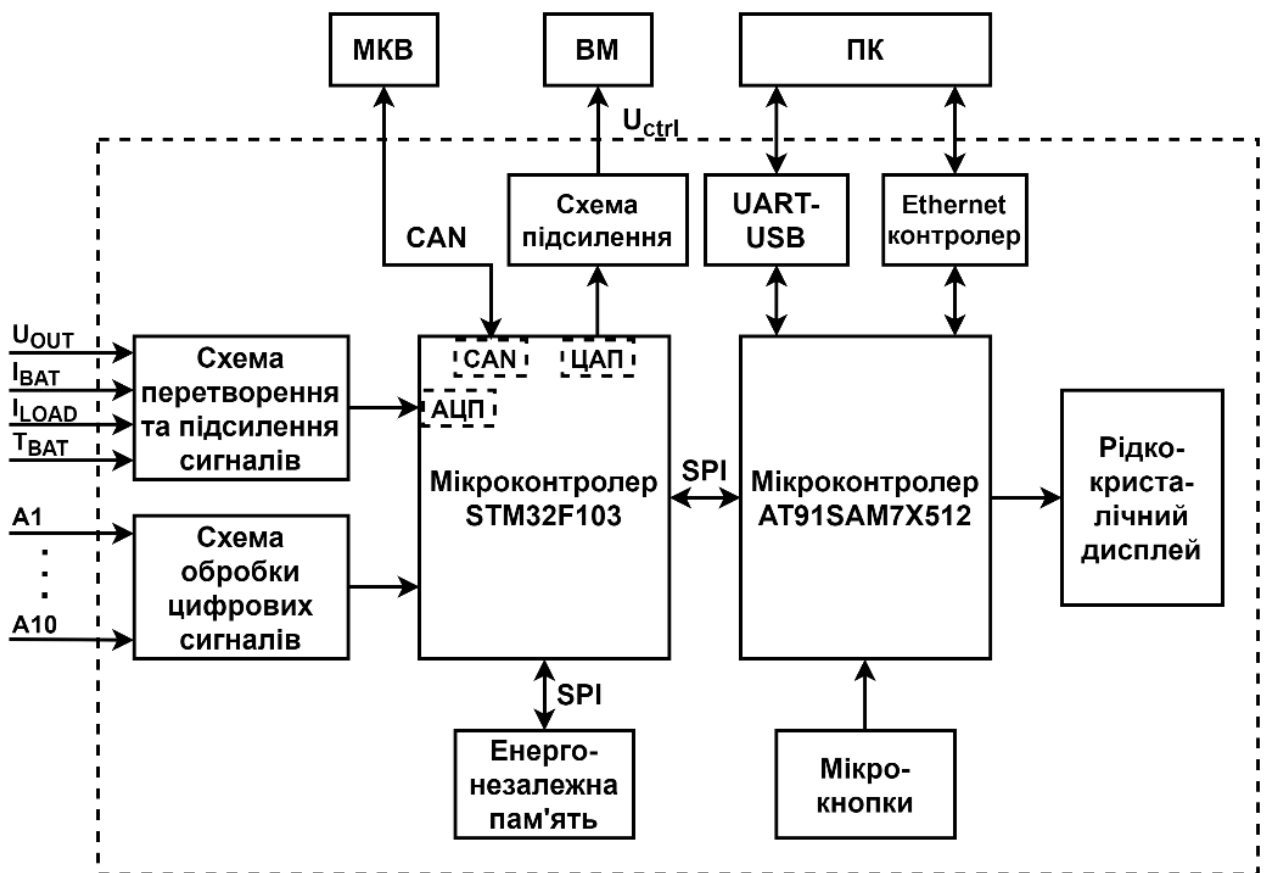


Рисунок 4.3 – Структурна схема центрального керуючого модуля ДБЖ

Апаратне забезпечення центрального керуючого модуля реалізоване з використанням сучасної елементної бази за принципом модульності та можливістю роботи в режимі реального часу. Управління роботою всіх вузлів та підсистем здійснюється двома мікроконтролерами, які містять усі необхідні периферійні засоби.

ЦКМ здійснює вимірювання наступних величин:

- вхідної напруги змінного струму кожної фази;
- вихідної напруги постійного струму;
- вихідного струму навантаження;
- струму (заряду / розряду) кожної групи АБ;
- температури АБ;
- цифрових сигналів про наявність аварійних станів ДБЖ.

4.3.2.1 Схемотехнічні рішення центрального керуючого модуля ДБЖ

На основі структурної схеми розроблено схему електричну принципову центрального керуючого модуля. Для керування режимами роботи ЦКМ використовуються два мікроконтролери із ARM архітектурою – AT91SAM7X512 та STM32F103VCT6.

Мікроконтролер DD7 AT91SAM7X512 використовується для задач, які не є критичними до часу виконання. До таких задач можна віднести: відображення інформації про стан електричних параметрів ДБЖ на рідкокристалічному індикаторі, опитування клавіатури, архівування даних в енергонезалежній пам'яті, передача інформації в персональний комп'ютер. Процес програмування мікроконтролера здійснюється з використанням JTAG інтерфейсу за допомогою роз'єму XP5 (рис. 4.4). До мікроконтролера DD7 під'єднаний кварцовий резонатор ZQ2 частотою 18,432 МГц. Мікроконтролер AT91SAM7X512 характеризується:

- високоефективним 32-розрядним процесорним ядром ARM7TDMI з архітектурою RISC;
- високошвидкісною Flash пам'яттю об'ємом 512 Кб;
- внутрішнім високошвидкісним статичним ОЗП об'ємом 128 Кб;
- наявністю модуля Ethernet MAC 10/100 Mbit Base-T та одноканального CAN-контролера;
- наявністю інтегрованого контролера інтерфейсу USB 2.0 (full speed).

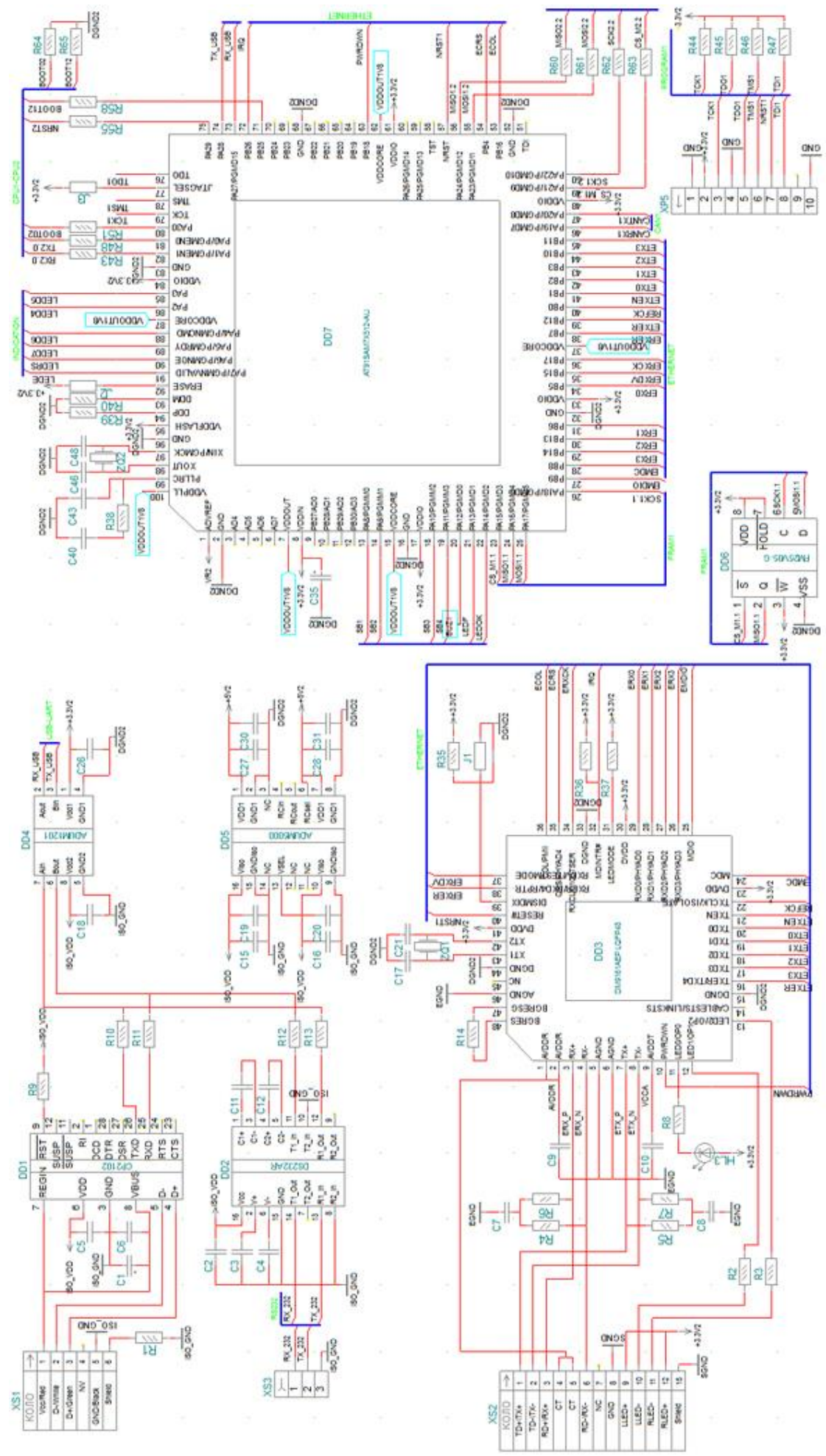


Рисунок 4.4 – Електрична принципова схема підключення мікроконтролера АТ91SAM7Х512 для обміну даними з ПК в

центральному керуючому модулі

Основними перевагами цього мікроконтролера є – висока продуктивність, розвинута система команд, різноманітність периферійних пристроїв. Передача даних в ПК може здійснюватися двома каналами: через послідовний інтерфейс або використовуючи технологію Ethernet. З'єднання з ПК по USB кабелю здійснюється використовуючи дві лінії послідовного інтерфейсу (RX_USB і TX_USB), які через двоканальний цифровий ізолятор ADuM1201ARZ DD4 подаються на мікросхему – перетворювач інтерфейсу USB - UART CP2102-GMR DD1, який з'єднаний з miniUSB роз'ємом XS1.

Мікросхема CP2102-GMR характеризується:

- швидкістю передачі даних до 1 Мб / с;
- енергонезалежною вбудованою пам'яттю EEPROM об'ємом 1024 байти;
- буфером приймача 576 байт та буфером передавача 640 байт.

Для забезпечення гальванічної розв'язки живлення мікросхем DD1 та DD4 напругою 5 В з колом живлення плати використовується ізольований DC/DC перетворювач ADuM5000ARWZ DD5.

Для передачі даних в ПК по Ethernet каналу використовується вбудований в мікроконтролер DD7 модуль Ethernet MAC сигнали від якого подаються на Ethernet-контролер DM9161AEP DD3. Він відповідає за перетворення сигналів, отриманих від мікроконтролера, в сигнали фізичного рівня Ethernet інтерфейсу для 100BASE-TX і 10BASE-T, які поступають на роз'єм J00-065NL XP2.

Для збереження архівних даних в енергонезалежній флеш пам'яті об'ємом 512 Кбіт використовується мікросхема DD6 FM25V05-G. Обмін інформацією з мікроконтролером DD7 здійснюється по інтерфейсу SPI.

Мікроконтролер DD10 STM32F103VCT6, схема включення якого показана на рис. 4.5, призначений для виконання задач, які потребують частого опитування стану ДБЖ та вимірювання його електричних параметрів за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) і швидкого реагування на їхню зміну шляхом подачі керуючого аналогового сигналу для регулювання рівня вихідної напруги випрямляючих модулів.

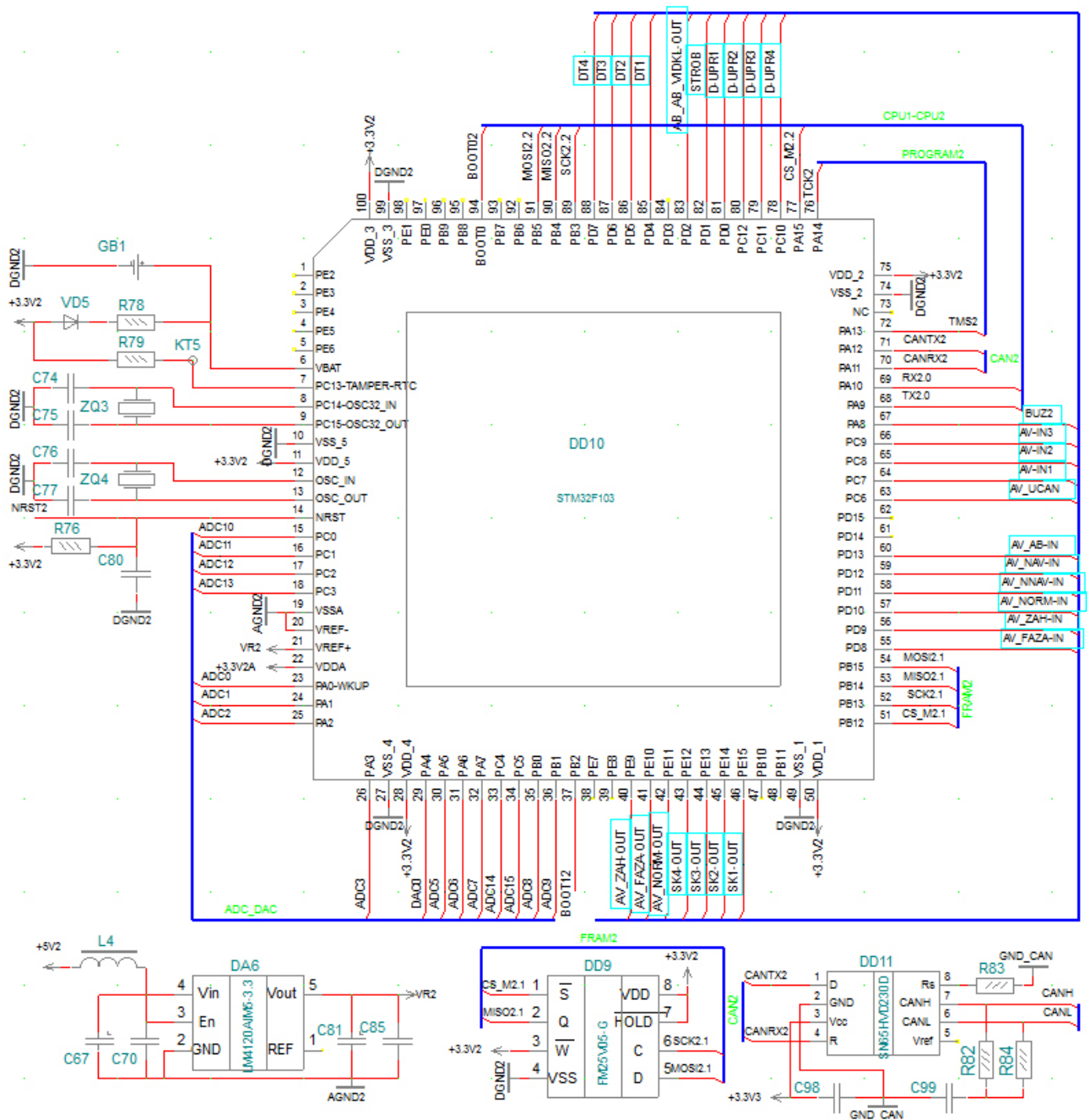


Рисунок 4.5 – Електрична принципова схема підключення мікроконтролера STM32F103VCT6 в центральному керуючому модулі

Мікроконтролер STM32F103VCT6 характеризується:

- високопродуктивним 32-розрядним процесорним ядром ARM Cortex-M3, максимальна частота якого становить 72 МГц;
- великим об'ємом оперативної (20 Кб) і флеш-пам'яті (512 Кб) на кристалі;
- наявністю RTC – вбудованого годинника реального часу;

- наявністю вбудованого 16-канального 12-розрядного АЦП та двоканального цифро-аналогового перетворювача (ЦАП);
- наявністю CAN-контролера для реалізації протоколів мережевої взаємодії.

До мікроконтролера DD10 під'єднані кварцові резонатори ZQ3 та ZQ4. Для живлення мікроконтролера використовується напруга +3,3 В. Керамічні конденсатори C89, C92..C97 з номіналом 100 нФ служать для фільтрації напруги живлення від імпульсних завад.

CAN-трансивер DD11 SN65HVD230D відповідає за перетворення сигналів від мікроконтролера DD10 в сигнали фізичного рівня CAN інтерфейсу та відправляє їх по CAN-мережі для обміну даними з модулями керування випрямлячами.

Виміряні значення напруг, струмів і цифрових сигналів аварійних станів ДБЖ зберігаються у внутрішній Flash-пам'яті ЦКМ і при встановленні зв'язку за допомогою програми моніторингу передаються в ПК.

Для вимірювання значень напруг і струмів використовуються шунти, подільники напруги та операційні підсилювачі AD627AR і LV2904. Схема підсилення забезпечує узгодження рівнів вхідних сигналів з діапазоном вимірювання аналого-цифрового перетворювача. Дискретизація вхідних сигналів здійснюється вбудованим в мікроконтролер 12-розрядним АЦП. Опорна напруга номіналом 3,3 В з точністю $\pm 0,2\%$, яка формується завдяки мікросхемі DA6 LM4120AIM5-3.3, подається на вхід VREF+ мікроконтролера DD10. Вона використовується в процесі аналого-цифрового та цифро-аналогового перетворення сигналів. Підвищення точності вимірювання електричних параметрів ДБЖ при реалізації створеного апаратного забезпечення досягається шляхом застосування фільтрації завад завдяки використанню конденсаторів в колах підсилення сигналів. Формула для перетворення напруги вхідного аналогового сигналу в цифровий код має вигляд:

$$N_{ADC} = V_{IN} \cdot \frac{2^n - 1}{V_{REF}}$$

де N_{ADC} – код, отриманий в результаті аналого-цифрового перетворення, V_{IN} – вхідна напруга, n – розрядність АЦП мікроконтролера DD10 ($n = 12$), V_{REF} – величина опорної напруги ($V_{REF} = 3,3$ В).

Для формування керуючого сигналу, який необхідний для регулювання рівня вихідної напруги випрямляючих модулів, використовується внутрішній цифро-аналоговий перетворювач мікроконтролера DD10. Він програмним способом генерує напругу в діапазоні від 0 до 3,3 В. Формула для перетворення цифрового коду в вихідну напругу має вигляд:

$$V_{OUT} = V_{REF} \cdot \frac{N_{DAC}}{2^n - 1},$$

де V_{OUT} – вихідна напруга, отримана в результаті аналого-цифрового перетворення, V_{REF} – величина опорної напруги ($V_{REF} = 3,3$ В), N_{DAC} – вхідний цифровий код з мікроконтролера, n – розрядність ЦАП мікроконтролера DD10 ($n = 12$).

Для підсилення вихідної напруги V_{OUT} керуючого сигналу мікроконтролера до 12 В в схемі застосовується операційний підсилювач DA11 типу LM2904М (рис. 4.6). Коефіцієнт підсилення задається співвідношенням прецизійних резисторів R152 і R164:

$$K_{amp} = 1 + \frac{R164}{R152},$$

де K_{amp} – коефіцієнт підсилення операційного підсилювача DA11:1, R152 – резистор, який встановлений між лінією AGND2 (0 В) і інверсним входом операційного підсилювача, який рівний 3,3 кОм $\pm 1\%$, R164 – резистор, який встановлений між інверсним входом операційного підсилювача і виходом, який рівний 10 кОм $\pm 1\%$.

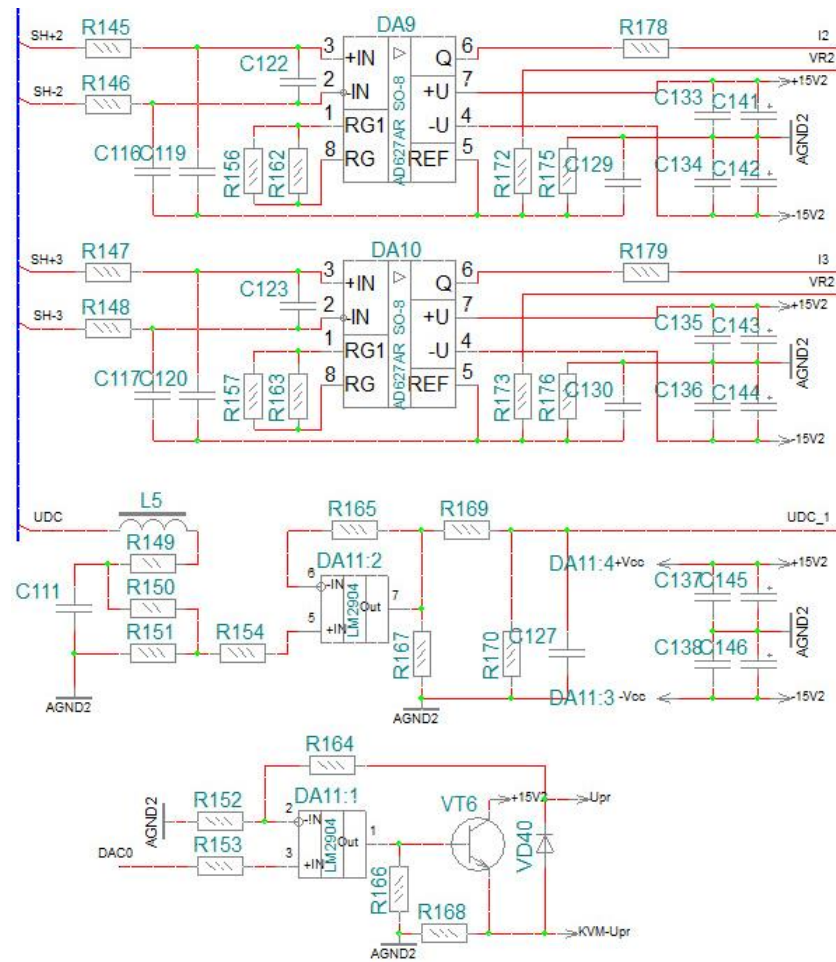


Рисунок 4.6 – Схема підсилення аналогових сигналів за допомогою операційних підсилювачів в ЦКМ

На рис. 4.7 зображено зовнішній вигляд дослідного взірця центрального керуючого модуля, реалізованого на базі мікроконтролерів AT91SAM7X512 та STM32F103VCT6.

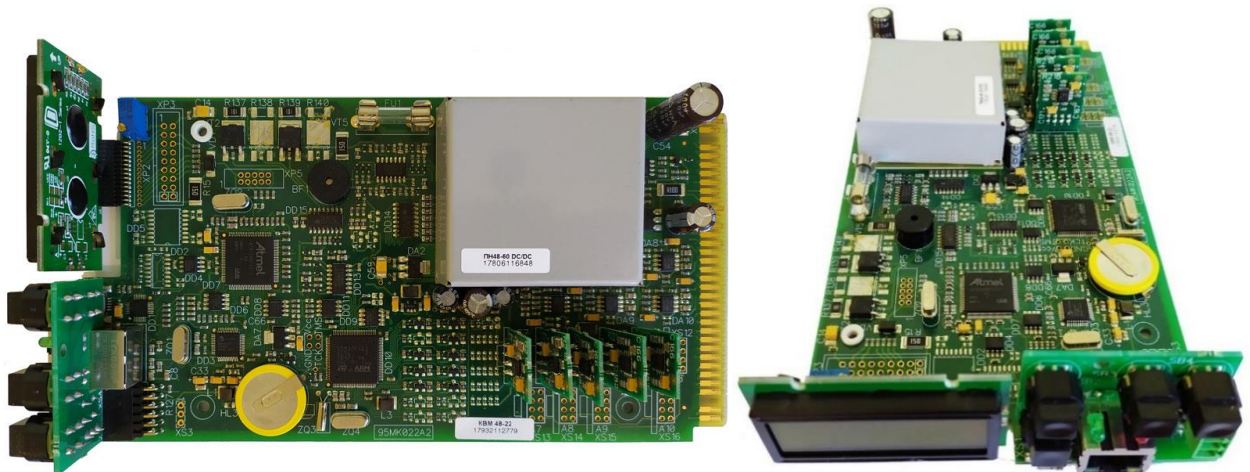


Рисунок 4.7 – Дослідний взірець центрального керуючого модуля ДБЖ

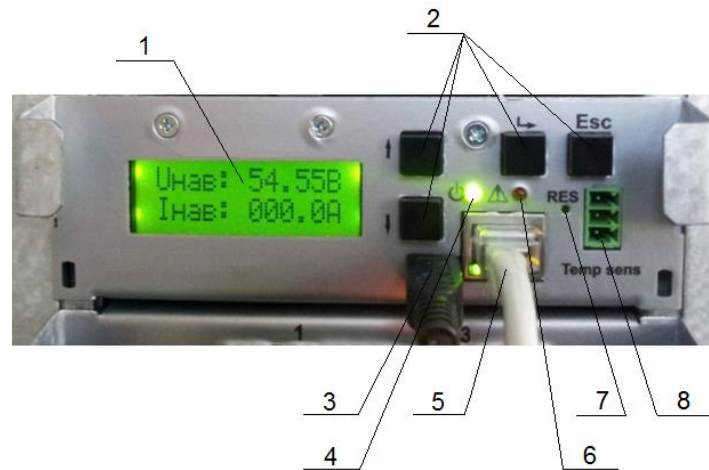


Рисунок 4.8 – Передня панель центрального керуючого модуля джерела безперебійного живлення

На передній панелі ЦКМ (рис. 4.8) розміщений дврядковий LCD-дисплей (1) для виведення інформації про стан та електричні параметри ДБЖ. Кнопки (2) призначені для навігації по меню ЦКМ при перегляді інформації про стан системи на LCD-дисплеї та для зміни параметрів налаштувань. Роз'єм типу miniUSB (3) використовується для локального підключення ЦКМ до ПК. Світлодіод (4) зеленого кольору призначений для індикації нормального режиму роботи модуля. Роз'єм (5) типу RJ45 (Ethernet-порт) використовується для віддаленого підключення до ПК для дистанційного моніторингу та зміни налаштувань ДБЖ. Світлодіод (6) червоного кольору сигналізує про наявність критичних аварійних ситуацій у модулях чи підсистемах ДБЖ. Кнопка (7) використовується для перезавантаження програмного забезпечення мікроконтролерів ЦКМ. Роз'єм (8) застосовується для під'єднання цифрового датчика, який призначений для вимірювання температури акумуляторних батарей.

Гнучка структура та сучасна елементна база центрального керуючого модуля джерела безперебійного живлення забезпечують автоматизацію та високу надійність процесів моніторингу, керування, збереження та передачі даних, що є важливою умовою створення сучасних інтелектуальних комп'ютеризованих приладів, які застосовуються в системах живлення.

4.3.2 Розробка модуля для керування випрямлячами ДБЖ

Модуль керування випрямлячами відповідає за моніторинг стану ВМ та за керування процесом їх ввімкнення / вимкнення після отримання відповідних команд від ЦКМ. На рис. 4.9 зображена структурна схема МКВ.

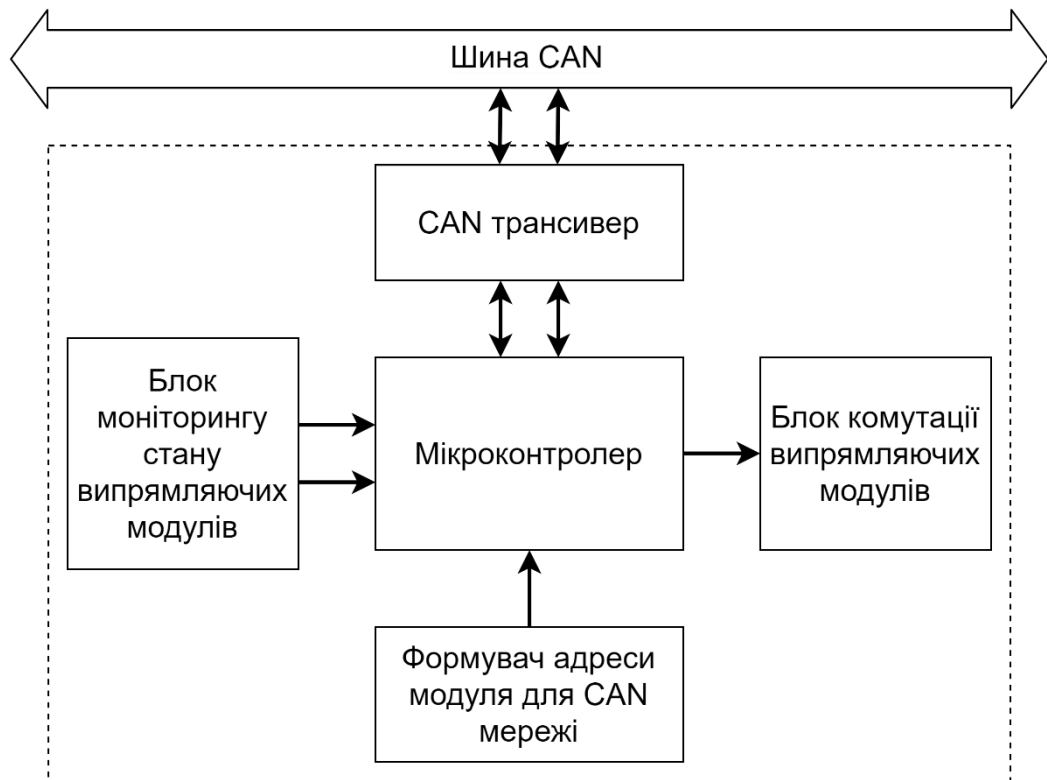


Рисунок 4.9 – Структурна схема модуля керування випрямлячами ДБЖ

Основним керуючим компонентом МКВ є мікроконтролер STM32F103VCT6, вибір якого був зумовлений наявністю в ньому вбудованого CAN-контролера для реалізації протоколів мережевої взаємодії з ЦКМ та наявністю вбудованого 12-розрядного АЦП для вимірювання струму в колі навантаження та температури модулів.

Блок моніторингу стану випрямляючих модулів здійснює діагностику їх справності та відповідає за вимірювання струму I_R та температури T_R . Інформація про результати вимірювань передаються в ЦКМ для вироблення відповідних керуючих дій.

Обмін даними з центральним керуючим модулем здійснюється по мережі CAN. Для цього кожен модуль повинен мати унікальну адресу, яка формується перемикачем з чотирьох елементів, кожен з яких може перебувати в стані логічного нуля або логічної одиниці. Після подачі напруги живлення мікроконтролер на початковому етапі виконання програми зчитує цю комбінацію і використовує її в якості адреси відповідного модуля.

CAN трансивер служить для перетворення сигналів від мікроконтролера у сигнали фізичного рівня CAN мережі з метою забезпечення обміну даними та командами з центральним керуючим модулем ДБЖ. Блок комутації випрямляючих модулів відповідає за узгодження рівнів сигналів, які генерує мікроконтролер для включення та виключення відповідного ВМ.

4.4 Реалізація алгоритмічного і програмного забезпечення для комп'ютеризованої системи керування і моніторингу ДБЖ

Для забезпечення функціонування апаратних засобів КС для керування та моніторингу ДБЖ відповідно до розроблених методів реалізовано спеціалізоване алгоритмічне забезпечення.

4.4.1 Алгоритмічне забезпечення мікроконтролерів

4.4.1.1 Алгоритм моніторингу стану та електричних параметрів ДБЖ

На рис. 4.10 зображена блок-схема алгоритму роботи програми мікроконтролера для реалізації функцій моніторингу стану та електричних параметрів ДБЖ. Робота програми починається з ініціалізації периферійних пристроїв мікроконтролера: шини SPI, I²C, послідовного інтерфейсу та Ethernet. Потім відбувається налаштування параметрів АЦП шляхом запису даних в відповідні регістри спеціального призначення.

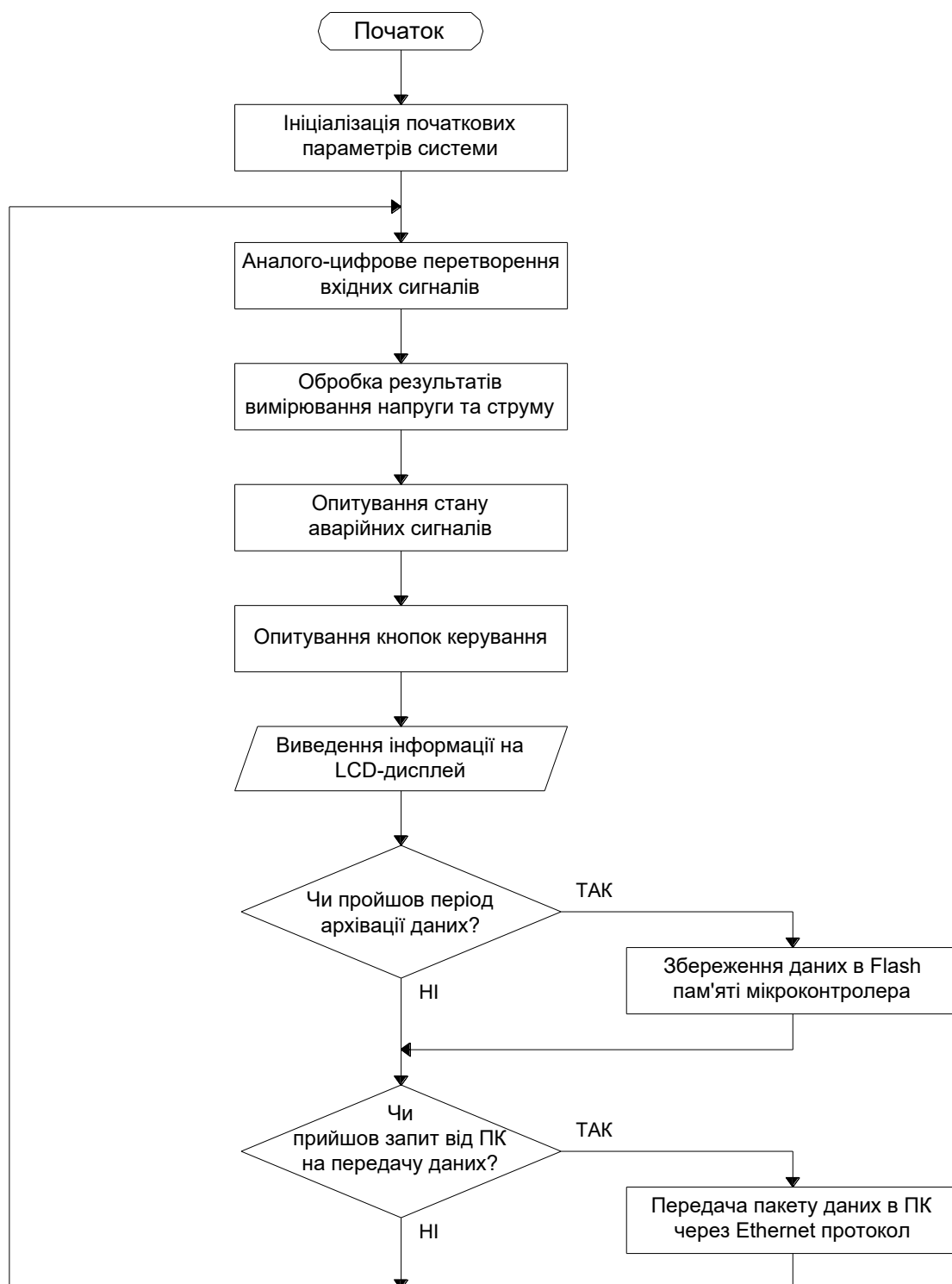


Рисунок 4.10 – Блок-схема алгоритму роботи програми мікроконтролера для реалізації функцій моніторингу стану та електричних параметрів ДБЖ

В головному циклі програми здійснюється аналого-цифрове перетворення вхідних сигналів, які формуються схемою вимірювання напруг і струмів. Потім

відбувається обробка результатів вимірювань шляхом цифрової фільтрації від шумів та завад та множення виміряних значень на відповідні коефіцієнти.

На наступному етапі мікроконтролер опитує цифрові сигнали, які вказують на наявність аварійних ситуацій у вузлах системи, та дискретні кнопки керування, які розміщені на передній панелі ЦКМ. Крім того, здійснюється отримання даних від годинника реального часу та обробка повідомлень від персонального комп'ютера. Після цього відповідна інформація про стан та електричні параметри системи виводиться на рідкокристалічний дисплей в режимі реального часу.

Виміряні дані з певною періодичністю записується в енергонезалежну пам'ять, створюючи таким чином архів, який періодично оновлюється. Період архівування можна міняти в налаштуваннях системи з допомогою кнопок і рідкокристалічного індикатора. Дані архіву можна передавати в персональний комп'ютер по Ethernet каналу або за допомогою послідовного інтерфейсу для подальшої обробки та відображення в зручній для користувача формі.

4.4.1.2 Алгоритм енергоефективного керування випрямлячами

Блок-схема алгоритму роботи ЦКМ, яка зображена на рис.4.11, є імплементацією методу адаптивного регулювання рівня завантаженості випрямляючих модулів ДБЖ, описаного в другому розділі дисертації.

Узагальнений алгоритм роботи ЦКМ в режимі енергоефективного керування випрямлячами ДБЖ розроблено на основі наступних критеріїв. Перш за все необхідно забезпечити безперебійне електропостачання споживачів. ККД системи повинен бути максимальним при максимальному значенні середнього напруження на відмову випрямляючих модулів. Живлення споживачів повинно відбуватися безперервно.

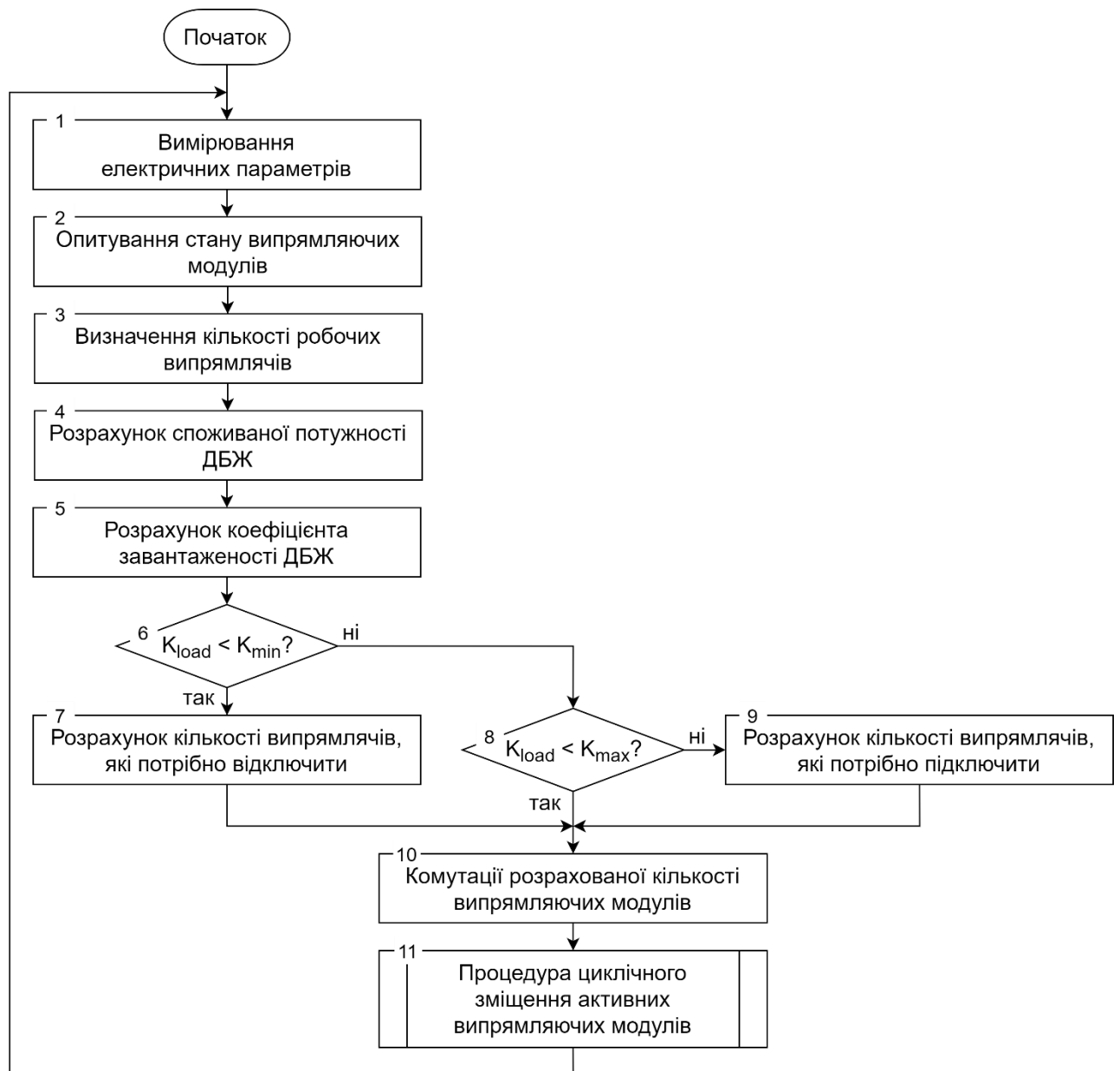


Рисунок 4.11 – Блок-схема алгоритму роботи мікроконтролера ЦКМ в режимі енергоефективного керування випрямлячами ДБЖ

На першому етапі роботи алгоритму здійснюється вимірювання значень струмів і напруг. Потім зчитується інформація про стан випрямлячів та визначається кількість модулів, які знаходяться в робочому стані. На наступному етапі розраховується споживана потужність на основі чого здійснюється розрахунок коефіцієнта завантаженості випрямляючих модулів K_{load} .

У випадку, якщо значення K_{load} менше за нижній пороговий рівень K_{min} , проводиться розрахунок кількості випрямлячів, які потрібно відключити для

того, щоб значення K_{load} збільшилося. Якщо значення K_{load} більше за пороговий рівень K_{max} , здійснюється розрахунок кількості випрямлячів, які потрібно підключити для того, щоб значення K_{load} зменшилося. Після цього відбувається підключення або відключення необхідної кількості випрямлячів завдяки чому коефіцієнт завантаженості повернеться в оптимальний з точки зору енергоефективності діапазон значень.

До переваг використання цього алгоритму можна віднести:

- підвищення ККД роботи системи безперебійного електроживлення;
- економія електроенергії;
- збільшення тривалості безвідмовної роботи випрямляючих модулів.

4.4.1.3 Алгоритм тестування акумуляторних батарей

В процесі функціонування ДБЖ передбачена можливість періодичного запуску процесу тестування справності акумуляторних батарей та оцінювання рівня її залишкової ємності методом контролю залишкової напруги батареї під час її часткового розряду та програмного обмеження струму розряду АБ. Процес тестування АБ можна запускати за допомогою кнопок керування центрального керуючого модуля, а також з використанням програми дистанційного моніторингу.

Під час тестування акумуляторів центральний керуючий модуль подає управляючий сигнал до випрямлячів з метою скидання вихідної напруги до рівня 48 В, відключаючи їх від живлення навантаження, яке починає брати енергію від акумуляторних батарей. В цьому режимі в колі АБ буде проходити такий струм, який необхідний для живлення навантаження. Відповідно до алгоритму тестування акумуляторних батарей припиняється, якщо виконується одна з двох умов: досягнуте порогове значення мінімальної напруги розряду АБ або перевищена максимальна тривалість процесу розряду. Обидва ці параметри задаються в налаштуваннях центрального керуючого модуля (див. рис. 4.16).

Якщо ДБЖ містить дві або більше груп акумуляторних батарей, то процес тестування буде здійснюватися одночасно для всіх груп, рівномірно розподіляючи струм навантаження на кожну з них. Чим більший струм розряду акумулятора тим меншою ємністю він володіє, тобто тим менше значення буде мати коефіцієнт відбору ємності μq , який визначається за формулою:

$$\mu q = \frac{Q_{fact}}{Q_{nom}}$$

де Q_{fact} та Q_{nom} – відповідно фактична (експлуатаційна) та номінальна ємність акумуляторної батареї.

Залежність коефіцієнта відбору ємності від режиму розряду АБ наведена в табл. 4.1, в якій також приведені значення коефіцієнта відбору струму μi :

$$\mu i = \frac{I_{fact}}{I_{10}}$$

де I_{fact} – фактичний струм розряду АБ, I_{10} – струм десятигодинного режиму розряду АБ. Коефіцієнт відбору струму μi показує в скільки разів фактичний струм розряду АБ більший за струм десятигодинного режиму розряду акумулятора.

Значення ємності акумуляторів залежить від їх температури. При зниженні температури збільшується внутрішній опір акумулятора, тому напруга в процесі розряду знижується швидше. В результаті цього ємність АБ зменшується. При підвищенні температури саморозряд акумулятора збільшується на 0,8 % на кожен градус зміни температури.

Таблиця 4.1 – Залежність коефіцієнтів μq та μi від тривалості розряду акумуляторних батарей

Тривалість розряду, год	0,5	1	2	3	4	5	6	7	7,5	8	9	10
μq	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0
μi	6,8	5,1	3,0	2,5	2,0	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	1,0

Ємність, яку акумулятор може віддати в номінальних умовах розряду визначається за формулою:

$$Q = \frac{I_f \cdot t_f}{\mu q \cdot [1 - 0,008 \cdot (T_{AB} - 20)]}, \quad (4.1)$$

де I_f – фактичний струм розряду АБ, t_f – фактична тривалість розряду АБ до мінімального граничного значення напруги, T_{AB} – фактична температура на акумуляторі.

Використовуючи дану формулу центральний керуючий модуль ДБЖ здійснює розрахунок ємності групи акумуляторних батарей в процесі їх тестування. Результати тестування зберігаються в енергонезалежній пам'яті ЦКМ та передаються до ПК для відображення допомогою програми дистанційного моніторингу.

На рис. 4.12 зображена блок-схема алгоритму роботи програми для підсистеми контролю параметрів акумуляторних батарей. В головному циклі відбувається очікування на дозвіл тестування від користувача системи. Якщо тестування дозволене, то мікроконтролер посилає команду початку процесу розряду акумуляторної батареї, впродовж якого за допомогою годинника реального часу фіксується тривалість тестування. Вимірювання напруги, струму, та температури акумуляторних батарей відбувається шляхом аналого-цифрового перетворення вхідних сигналів. Здійснюється накопичення вимірних значень і їх усереднення.

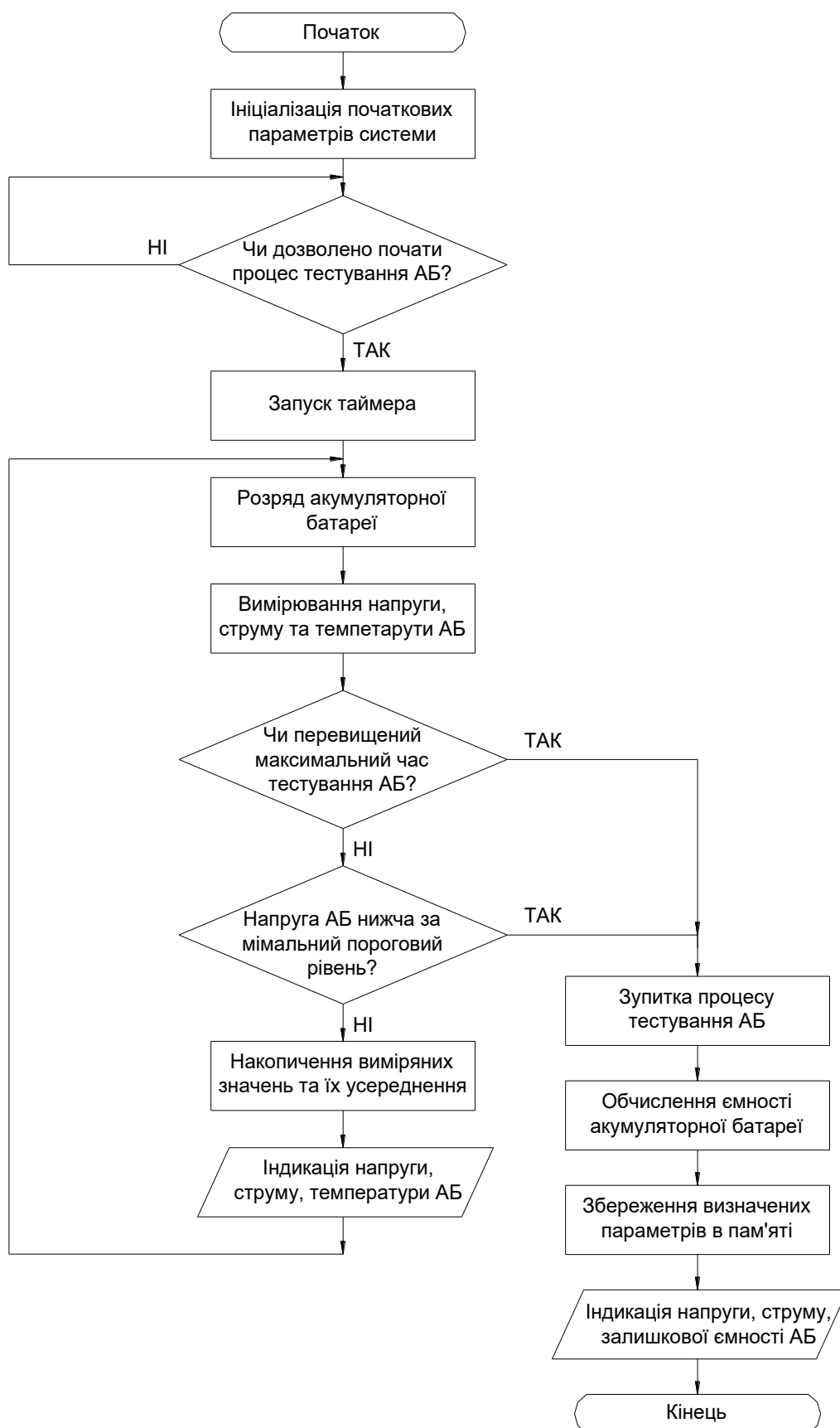


Рисунок 4.12 – Блок-схема алгоритму роботи програми для тестування акумуляторних батарей ДБЖ

На основі виміряних, накопичених і усереднених даних про напругу, струм та температуру АБ здійснюється обрахунок її залишкової ємності за допомогою формули (4.1). Визначена інформація з певною періодичністю записується в енергонезалежну пам'ять.

Значення напруги акумуляторної батареї порівнюється з мінімальним пороговим рівнем. Якщо напруга опустилась нижче цього рівня, то мікроконтролер генерує команду для відключення контактора кола АБ. Це необхідно для того, щоб уникнути глибокого розряду акумуляторної батареї, який призводить до зниження терміну її служби. Якщо тривалість розряду АБ перевищує максимальний час тестування, який заданий в налаштуваннях пристрою, то процес розряду зупиняється. Мікроконтролер генерує команду для запуску процесу заряду АБ.

4.4.1.4 Алгоритм роботи програми для модуля керування випрямлячами

Алгоритм роботи програми мікроконтролера для модуля керування випрямлячами ДБЖ, блок-схема якого представлена на рис. 4.13, містить 10 блоків, які виконують наступні операції.

На початку роботи програми відбувається ініціалізація інтерфейсу CAN та налаштування внутрішнього АЦП мікроконтролера (блок 1). Після цього здійснюється опитування стану перемикачів для отримання унікальної адреси модуля в CAN мережі (блок 2). Головний цикл програми містить такі підпрограми: опитування стану випрямляючих модулів (блок 3) з метою діагностики несправностей (блок 4). Якщо був виявлений хоча б один несправний випрямляч, то здійснюється відправлення відповідного повідомлення з кодом несправності до мікроконтролерів ЦКМ по CAN мережі (блок 5).

На наступному етапі здійснюється вимірювання струму I_R та температури T_R випрямлячів (блок 6) та їх порівняння з відповідними пороговими значеннями I_{max} та T_{max} (блок 7). В результаті, якщо було зафіксоване перевищення якогось з цих параметрів за допустиму норму, відбувається відправлення відповідного повідомлення до ЦКМ по мережі CAN (блок 8) для здійснення відповідних керуючих дій.

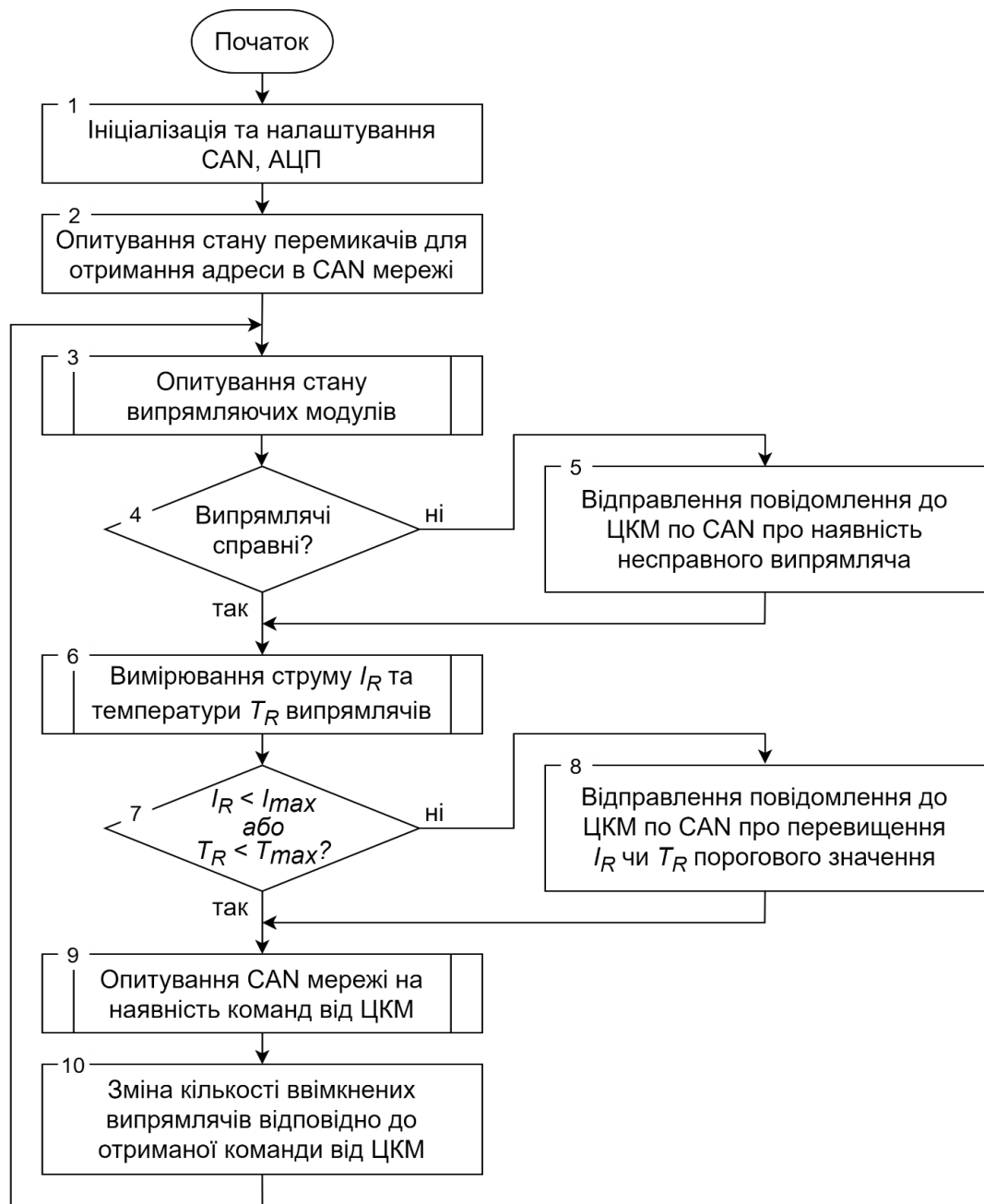


Рисунок 4.13 – Блок-схема алгоритму роботи мікроконтролера ЦКМ в режимі енергоефективного керування випрямлячами ДБЖ

Після цього відбувається опитування CAN мережі на наявність команд від ЦКМ (блок 9). У випадку, якщо була отримана команда про необхідність зміни комбінації ввімкнених випрямлячів, то мікроконтролер генерує відповідні управляючі сигнали для виконання цієї команди (блок 10).

4.4.2 Розробка програмного забезпечення для мікроконтролерів

З метою реалізації ефективної роботи апаратних засобів комп'ютеризованої системи на основі запропонованих в попередніх розділах дисертації методів та розроблених на їх основі алгоритмів створене відповідне програмне забезпечення для мікроконтролерів центрального керуючого модуля та модуля для керування випрямлячами.

Якість і швидкість розробки програмного забезпечення залежить від вибору інструментів його реалізації. Тому потрібно було підібрати оптимальний набір засобів, який включає середовище розробки, мову програмування, бібліотеки програмних компонентів.

Для програмування мікроконтролерів, які використовуються в керуючих модулях ДБЖ, було використано середовище розробки MDK-ARM Keil μ Vision5 IDE із додатково встановленими бібліотеками для роботи з мікроконтролерами сімейства STM32 та AT91SAM7. Програмне забезпечення для мікроконтролерів реалізоване на мові програмування C, яка характеризується високою продуктивністю, сучасним набором типів даних і операторів. У мові C гармонійно поєднуються властивості мови високого рівня з можливостями низькорівневого програмування. Вибір цієї мови був зумовлений ще й тим, що вона містить велику кількість бібліотек для роботи з периферією мікроконтролерів архітектури ARM.

Для зручності реалізації програмного забезпечення для мікроконтролерів в дисертаційній роботі було застосовано модульну концепцію програмування. Відповідно до неї кожен окремий модуль реалізовує певну функціональність. Для відображення взаємозв'язків між головними програмними компонентами розроблено функціональну схему ПЗ для мікроконтролерів, яку представлено на рис. 4.14.

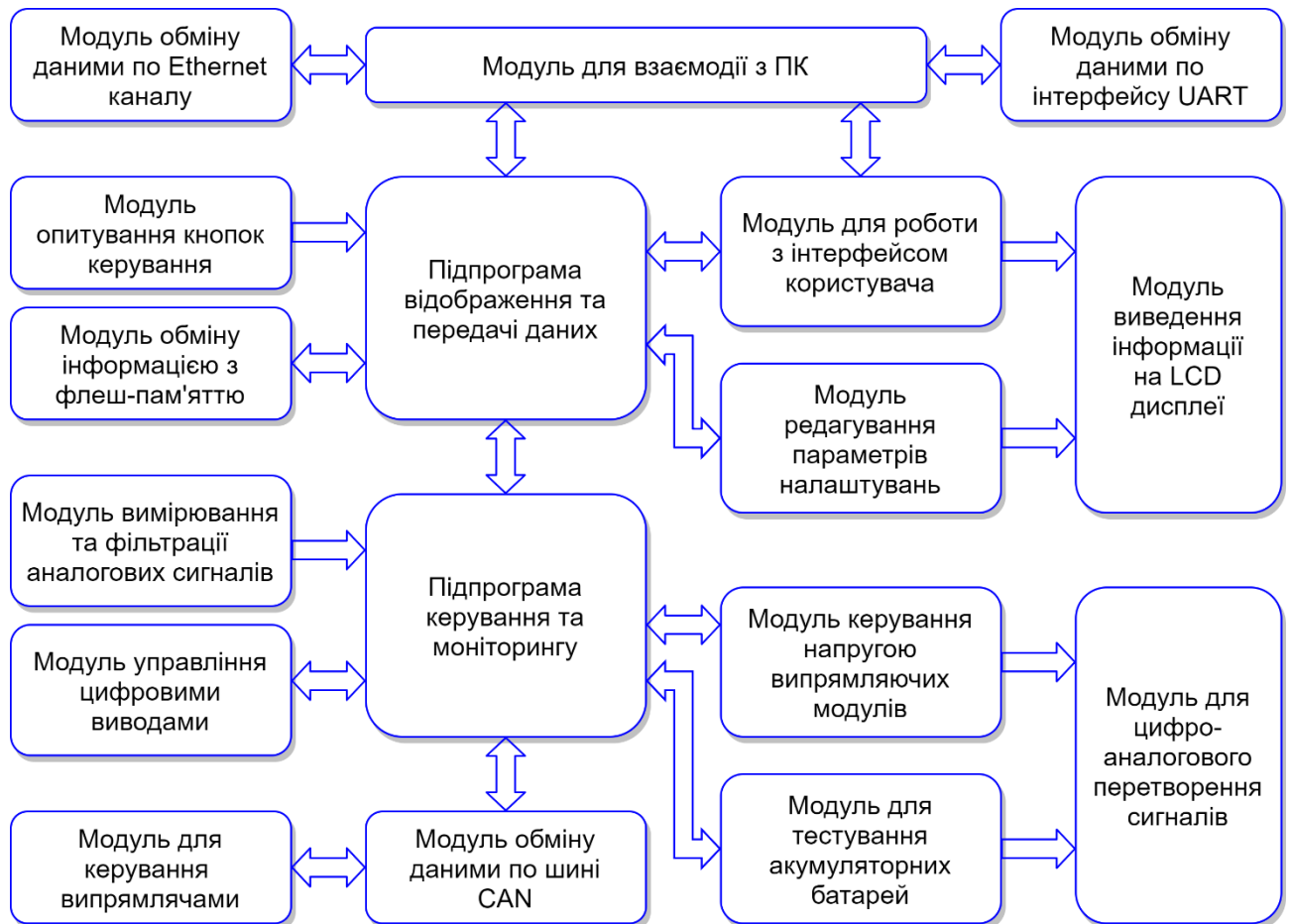


Рисунок 4.14 – Структура програмного забезпечення для мікроконтролерів

Програмне забезпечення для мікроконтролера AT91SAM7X512 ЦКМ містить такі модулі:

- "parameters.c" – модуль редагування параметрів налаштувань;
- "gui.c" – модуль для роботи з інтерфейсом користувача;
- "lcd.c" – модуль виведення інформації на LCD дисплеї;
- "ethernet.c" – модуль обміну даними по Ethernet каналу;
- "key.c" – модуль опитування кнопок керування;
- "flash.c" – модуль обміну інформацією з флеш-пам'яттю;
- "uart.c" – модуль обміну даними по інтерфейсу UART;
- "pc.c" – модуль для взаємодії з ПК.

До складу програмного забезпечення для мікроконтролера STM32F103VCT6 ЦКМ входять такі модулі:

- "adc.c" – модуль вимірювання та фільтрації аналогових сигналів;
- "io.c" – модуль управління цифровими виводами;
- "can.c" – модуль обміну даними по шині CAN;
- "testing.c" – модуль для тестування акумуляторних батарей;
- "control.c" – модуль керування напругою випрямляючих модулів;
- "dac.c" – модуль для цифро-аналогового перетворення сигналів;
- "rectifier.c" – модуль для керування випрямлячами.

4.4.3 Розробка програмного забезпечення для дистанційного моніторингу стану та електричних параметрів ДБЖ

Важливим елементом розробленої комп'ютеризованої системи є програмне забезпечення з графічним інтерфейсом користувача, яке призначене для візуального представлення функціонування системи, перегляду архівних даних, вибору режимів роботи та зміни параметрів налаштувань тощо.

На основі результатів проведених досліджень виконано розробку спеціалізованого програмного забезпечення для дистанційного моніторингу стану та електричних параметрів ДБЖ. Функції та компоненти програмного додатку з графічним інтерфейсом користувача реалізовані з використанням мови програмування Object Pascal, яка є поширеною мовою об'єктно-орієнтованого програмування і дає змогу створювати програми ефективні за критеріями швидкості виконання та об'єму коду. В якості середовища розробки ПЗ було обрано Embarcadero Delphi, яке містить велику кількість готових GUI компонентів, що дозволяють реалізовувати зручний користувацький інтерфейс в поєднанні з високим рівнем функціональності та повноти застосування наявних обчислювальних ресурсів. Зовнішній вигляд програми дистанційного моніторингу (ПДМ) ДБЖ зображено на рис. 4.15.

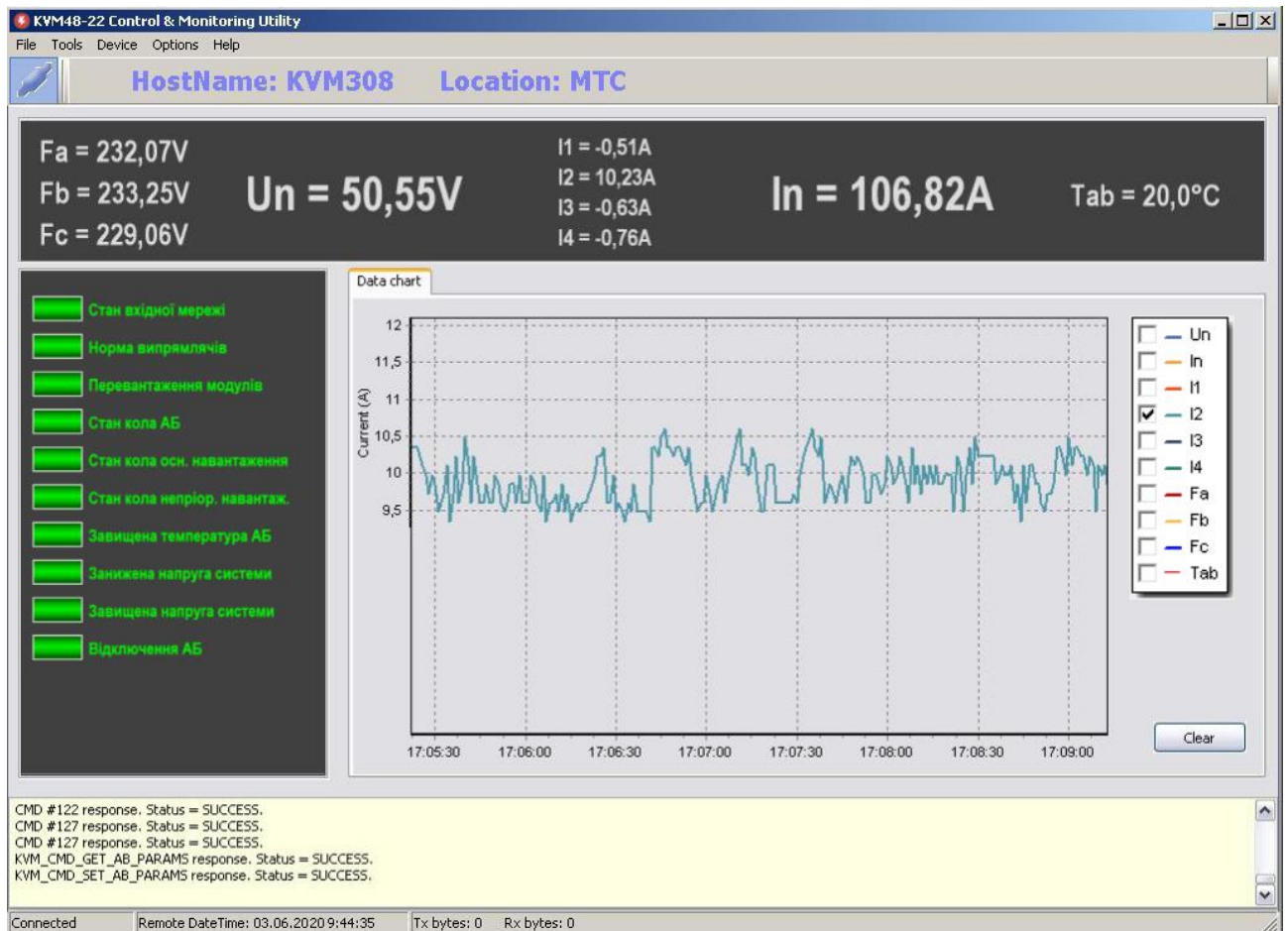


Рисунок 4.15 – Загальний вигляд графічного інтерфейсу програмного забезпечення в процесі відображення даних моніторингу

Розроблене програмне забезпечення містить кілька функціональних модулів, які відповідають за отримання, накопичення та відображення інформації про стан та електричні параметри ДБЖ. Опрацювання даних здійснюється в процесі вимірювання електричних параметрів ДБЖ в режимі реального часу і в режимі обробки попередньо збереженої інформації. ПЗ передбачає можливість представлення даних у графічному вигляді та зберігання результатів моніторингу у файлі для їх подальшого опрацювання в інших програмних засобах.

Після успішного підключення до ЦКМ оператор може переглядати відображення графіків зміни струмів та напруг ДБЖ в режимі реального часу. При цьому передбачена можливість зміни масштабу відображення кривих з результатами моніторингу.

В програмному додатку передбачена можливість дистанційної зміни параметрів налаштувань, які зберігаються в пам'яті центрального керуючого модуля. Діалогове вікно «Device AB Parameters» (рис. 4.16) призначене для зміни параметрів акумуляторних батарей ДБЖ.

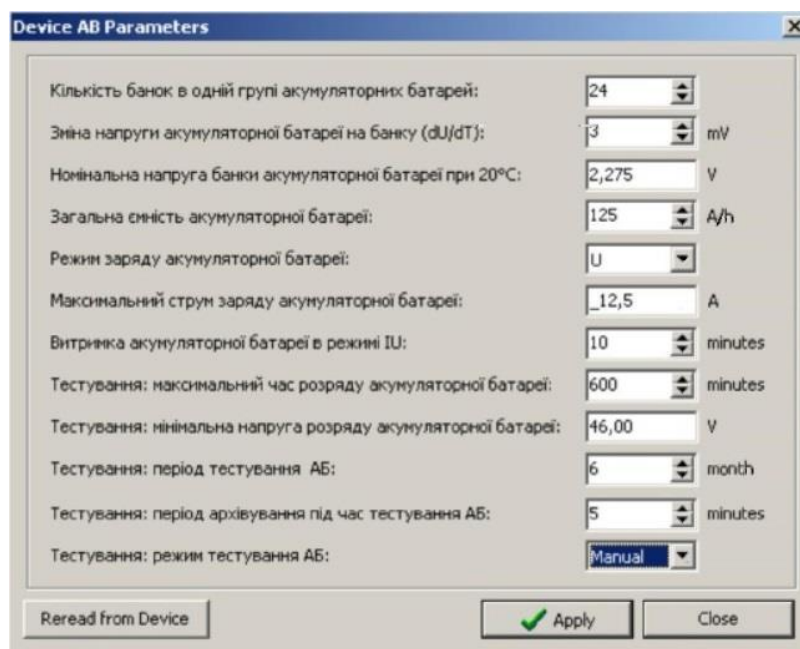


Рисунок 4.16 – Діалогове вікно для перегляду та зміни параметрів акумуляторних батарей ДБЖ

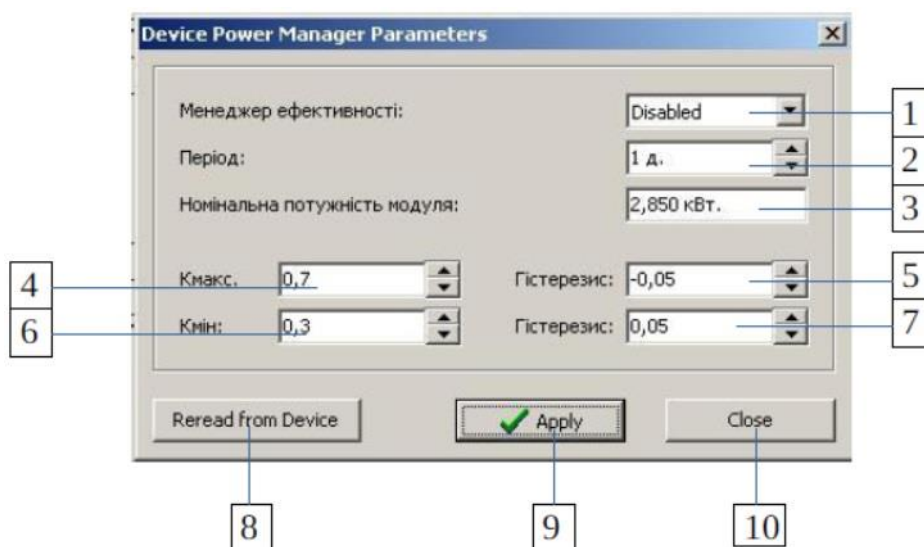


Рисунок 4.17 – Діалогове вікно для перегляду та зміни параметрів налаштувань режиму енергоефективного керування випрямлячами ДБЖ

Діалогове вікно Device Power Manager Parameters (рис. 4.17) служить для перегляду та зміни параметрів налаштувань режиму енергоефективного керування випрямлячами ДБЖ.

В цьому вікні є можливість вмикати чи вимикати режим енергоефективного керування випрямлячами (1), вибирати період роботи кожної комбінації навантажених випрямляючих модулів в процесі їх циклічного зміщення (2), задати значення номінальної потужності одного випрямляючого модуля (3), змінити коефіцієнти максимального (4) та мінімального (6) порогових рівнів коефіцієнта завантаженості випрямлячів а також значення їх гістерезисів (5) і (7). Для того, щоб отримати з пам'яті ЦКМ та відобразити значення поточних параметрів служить кнопка «Read from Device» (8). Кнопка «Apply» (9) призначена для записування оновлених значень параметрів в пам'ять центрального керуючого модуля ДБЖ.

На рис. 4.18 представлено програмний інтерфейс дистанційного моніторингу комп'ютеризованої системи ДБЖ, який в табличному вигляді відображає архівні дані результатів вимірювання електричних параметрів ДБЖ у вікні Device DataLog. Варто зауважити, що в розробленому додатку передбачена можливість експорту архівних даних в зовнішній файл, назву якого можна вказати натиснувши на функціональну кнопку «Export».

Розроблене ПЗ дозволяє оперативно, надійно, в режимі реального часу виконувати моніторинг електричних параметрів та контроль стану ДБЖ. Крім того, воно характеризується наявністю розширених функціональних можливостей, які дають змогу здійснювати запуск процедури тестування працездатності акумуляторних батарей в дистанційному режимі.

Ще однією особливістю розробленого програмного забезпечення є наявність інструментів для оновлення ПЗ мікроконтролерів ЦКМ ДБЖ в дистанційному режимі за допомогою вікна Firmware Update, яке знаходиться в пункті меню Tools.

#	Date Time	Alarms	Un (V)	Ua (V)	Ub (V)	Uc (V)	In (A)	I1 (A)	I2 (A)	I3 (A)	I4 (A)	Tab (°C)
237	02.06.2020 17:00:12	-----8--	50,00	220,76	220,73	220,56	11,5	0,0	-13,0	0,0	0,0	20,0
238	02.06.2020 17:05:11	-----8--	49,27	226,96	213,63	222,34	11,2	-0,1	-12,8	0,0	0,0	20,0
239	02.06.2020 17:05:36	-----8--	49,25	225,67	215,19	221,95	11,2	-0,1	-12,8	-0,1	0,0	20,0
240	02.06.2020 17:09:18	-----8--	49,01	223,58	222,29	217,86	11,2	-0,1	-12,6	-0,1	0,0	20,0
241	01.07.2020 17:12:55	-----8--	50,43	229,13	218,78	216,63	11,4	0,0	-2,2	0,0	0,0	20,0
242	02.07.2020 16:12:55	-----8--	50,42	231,22	218,15	216,09	11,4	-0,1	-2,2	0,0	0,0	20,0
243	02.08.2020 18:12:55	-----8--	50,43	230,34	218,31	216,09	11,5	-0,1	-2,2	0,0	0,0	20,0
244	02.08.2020 18:13:07	-----8--	51,02	231,71	216,59	215,78	11,6	-0,1	3,2	0,0	0,0	20,0
245	02.07.2020 17:13:34	-----8--	53,00	231,63	215,50	216,86	12,1	0,0	10,0	0,0	0,0	20,0
246	02.08.2020 17:13:34	-----8--	53,20	232,67	215,19	216,78	12,1	0,0	10,0	0,0	0,0	20,0
247	02.12.2020 17:13:34	-----8--	53,44	232,92	215,11	216,94	12,2	0,0	10,0	0,0	0,0	20,0
248	02.06.2020 17:13:51	-----8--	53,62	232,59	214,72	216,63	12,2	0,0	10,0	0,0	0,0	20,0
249	02.06.2020 17:15:42	---4-----	51,29	228,25	217,29	218,48	11,7	0,0	-13,1	0,0	0,0	20,0
250	02.06.2020 17:15:45	-----8--	50,98	227,84	217,22	218,56	11,6	0,0	-13,1	0,0	0,0	20,0
251	02.06.2020 17:17:18	---4-----	54,61	223,58	214,49	227,82	12,4	0,0	-0,1	0,0	0,0	20,0

Рисунок 4.18 – Результати виконання програмного модуля для відображення збережених значень електричних параметрів ДБЖ в табличній формі

В наступних частинах четвертого розділу представлено результати реалізації методів, які обґрунтовані та детально описані в другому та третьому розділах з використанням розробленого апаратно-програмного забезпечення.

4.5 Експериментальні дослідження комп'ютеризованої системи керування та моніторингу ДБЖ

4.5.1 Опис експериментальної установки

Для проведення експериментів з метою перевірки ефективності методів, які розроблені в попередніх розділах дисертаційної роботи, реалізовано комп'ютеризовану систему керування та моніторингу джерел безперебійного живлення. Експериментальні дослідження були проведені на обладнанні ТОВ «ТД Інтеграл». В табл. 4.2 наведені технічні характеристики джерела безперебійного живлення, яка досліджувалась в даній дисертаційній роботі.

На рис. 4.19 зображено зовнішній вигляд експериментальної установки модульного джерела безперебійного електроживлення, яка використовувалась для проведення дисертаційного дослідження.

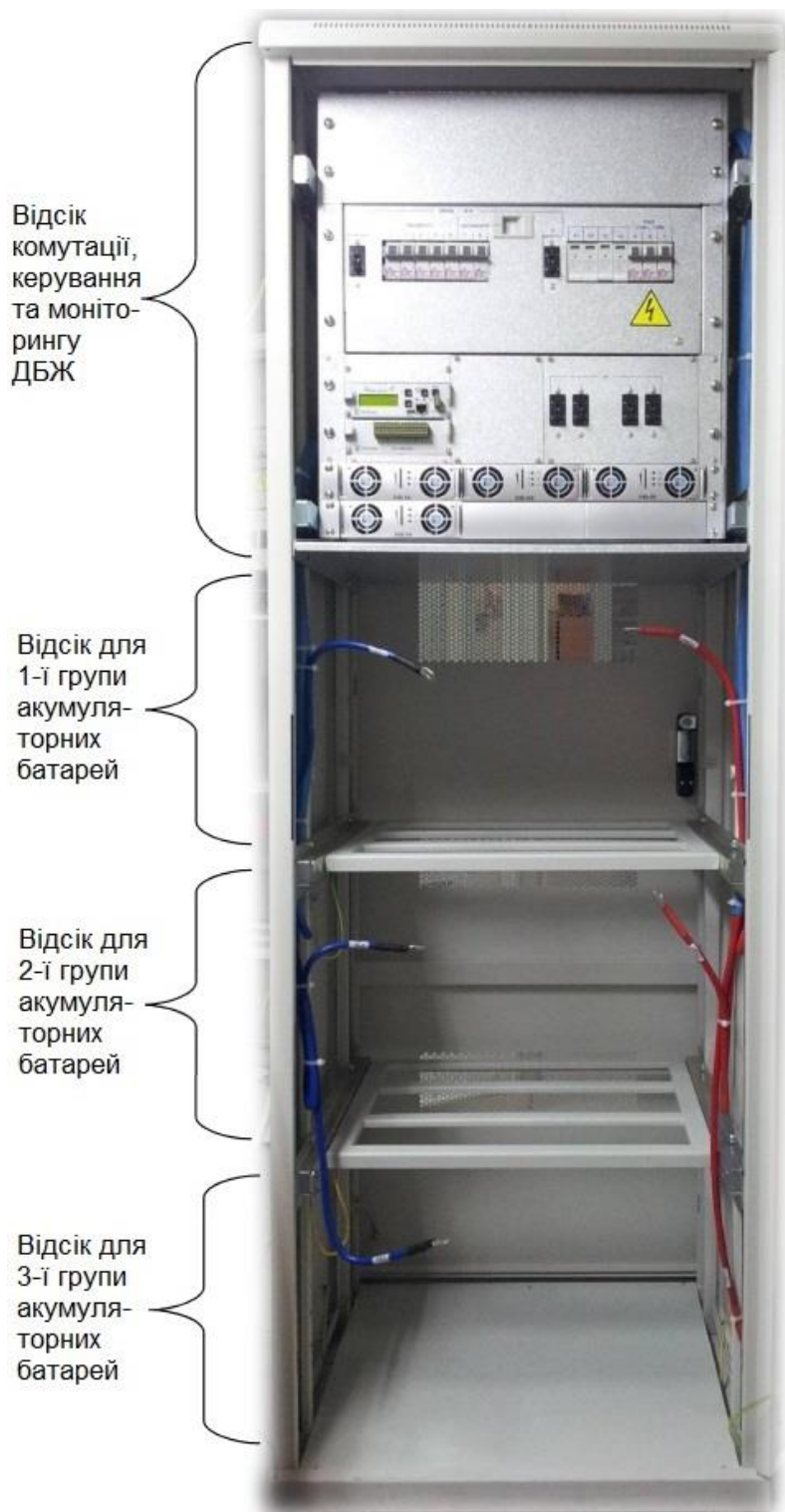


Рисунок 4.19 – Зовнішній вигляд експериментальної установки модульного джерела безперебійного електроживлення

Зовнішній вигляд підсистеми керування та моніторингу представлено на рис. 4.20.

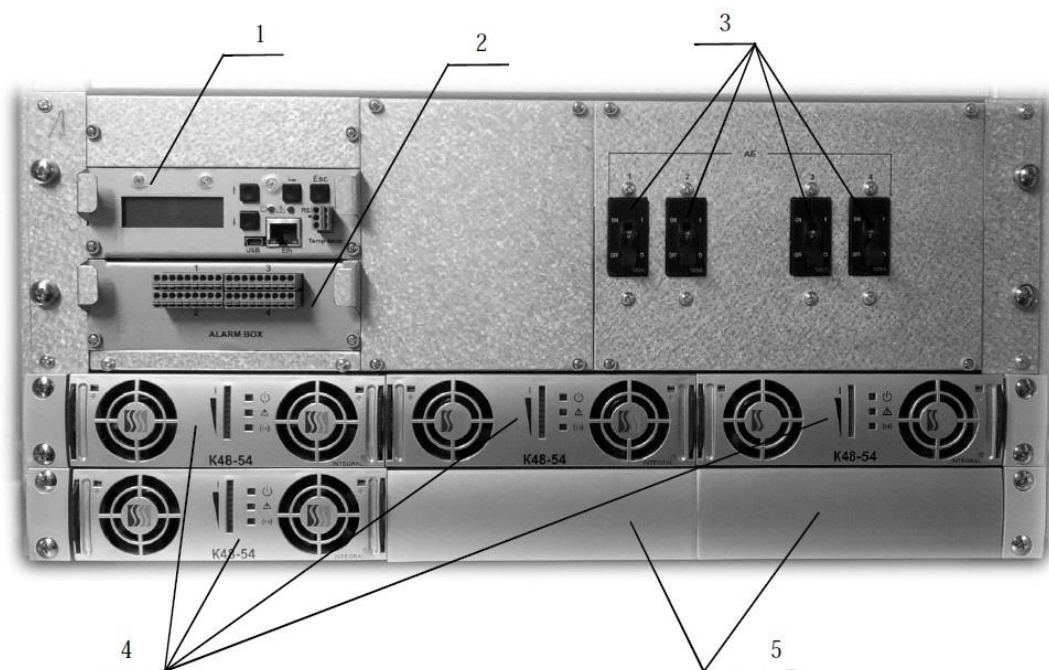


Рисунок 4.20 – Зовнішній вигляд підсистеми керування та моніторингу експериментальної установки модульного джерела безперебійного живлення

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики джерела безперебійного живлення

Параметр	Значення
Номінальна вхідна напруга	220 В / 380 В
Мінімальна вхідна напруга (при якій забезпечуються вихідні параметри ДБЖ)	175 ±5 В
Мінімальна вхідна напруга (при якій забезпечується працездатність ДБЖ)	100 ±5 В
Максимальна вхідна напруга	290 ±5 В
Частота вхідної мережі змінного струму	50 ±5 Гц
Максимальний вхідний струм (при напрузі 180 В)	71,82 А
Кількість випрямляючих модулів	4 шт.
Максимальна потужність споживання випрямляючих модулів	12928 Вт
Максимальна потужність при вихідній напрузі 48 В	12312 Вт
Мінімальна вихідна напруга	40 В
Максимальна вихідна напруга	57 В

Підсистема керування та моніторингу експериментальної установки модульного ДБЖ містить центральний керуючий модуль (1), модуль контролю аварійних станів і резервного управління "ALARM BOX" (2); автоматичні вимикачі комутацій акумуляторних батарей (3); випрямляючі модулі K48-54 (4); фальш-панелі (5), які закривають місця для встановлення додаткових випрямляючих модулів, що можуть бути використані для нарощення вихідної потужності джерела безперебійного живлення.

Технічні характеристики випрямляючого модуля (рис. 4.21), який використовувався в досліджуваному ДБЖ, приведені в табл. 4.3.



Рисунок 4.21 – Зовнішній вигляд випрямляючого модуля ДБЖ

Таблиця 4.3 – Технічні характеристики випрямляючого модуля ДБЖ

Параметр	Значення
Вихідна потужність	3000 Вт в діапазоні 170÷265 В
Вхідна напруга	100÷170÷275 ±5 В
Максимальна вихідна напруга	57 В
Частота	50 ±6 Гц
Максимальний струм	54 А
Коефіцієнт корисної дії	>95 %

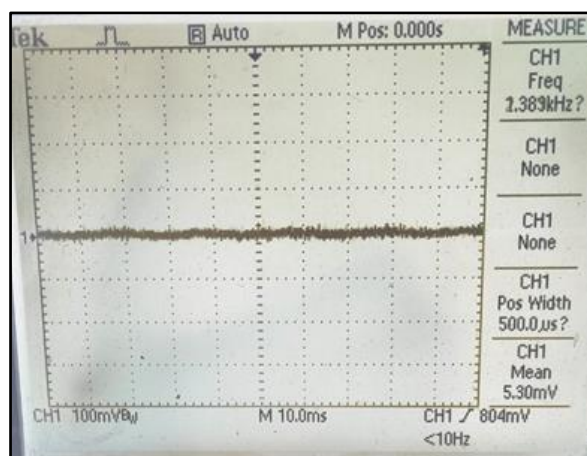
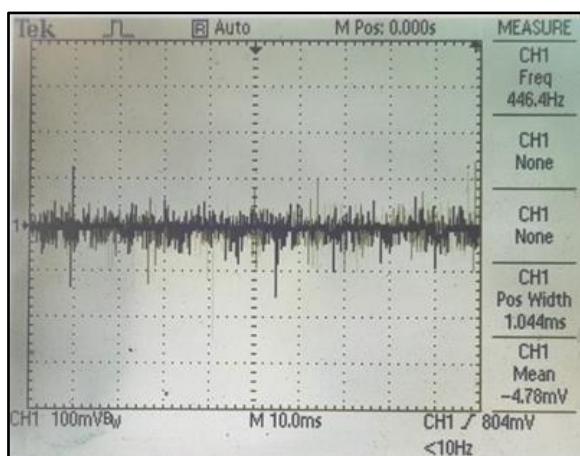
Для підвищення ефективності перетворення електроенергії та покращення якості вихідної напруги у випрямляючому модулі ДБЖ використано резонансні імпульсні перетворювачі, які характеризуються малими втратами енергії а також адаптивною цифровою фільтрацією імпульсних завад у колі керування.

Резонансні перетворювачі базуються на схемах традиційних високочастотних перетворювачів напруги, в які введені резонансні контури, утворені додатковими або паразитними реактивними елементами. Струм, або напруга на ключі за час перемикання близькі до нульового значення, завдяки чому усуваються втрати на включення або виключення, а для деяких режимів усуваються обидва види втрат – і на включення і на виключення. Тому резонансні перетворювачі працюють на значно вищих частотах, ніж звичайні ШІМ-перетворювачі.

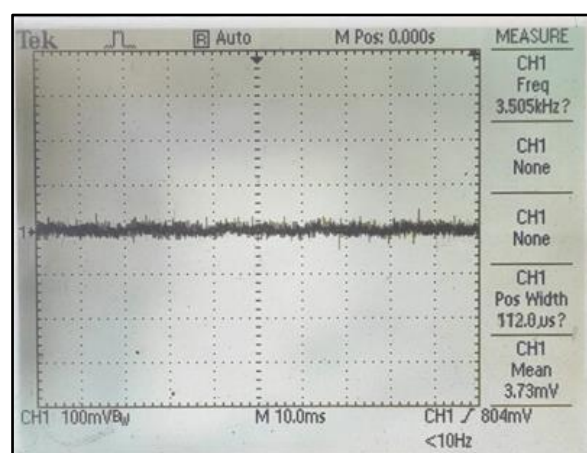
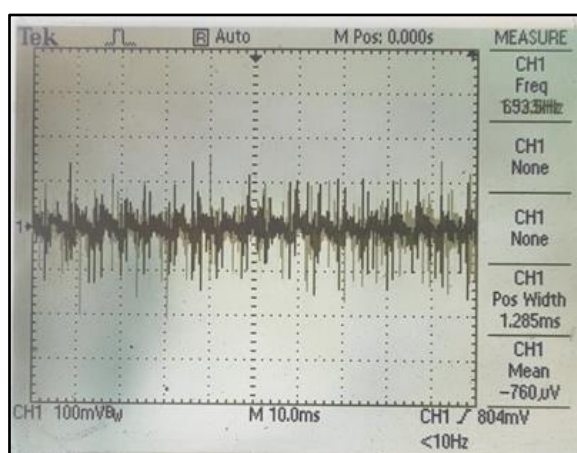
Адаптивні нелінійні регулятори випрямляючого модуля, які реалізовані з застосуванням цифрового сигнального процесора, базуються на інтелектуальних методах керування. Впровадження резонансних перетворювачів з множинним підключенням у випрямляючих модулях ДБЖ дозволило підвищити їх енергоефективність та надійність, покращити електромагнітну сумісність при невеликих розмірах і мінімальній масі.

Для забезпечення високої якості вихідної напруги важливо було мінімізувати психофотометричний шум, який являє собою напругу завад в спектральному діапазоні, з врахуванням чутливості органів слуху людини до коливань різних частот. Згладжування пульсацій напруги живлення було забезпечене вхідним і вихідним фільтрами з низькою частотою пропускання.

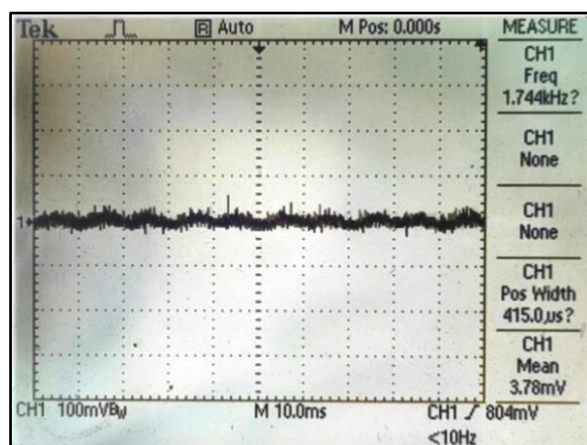
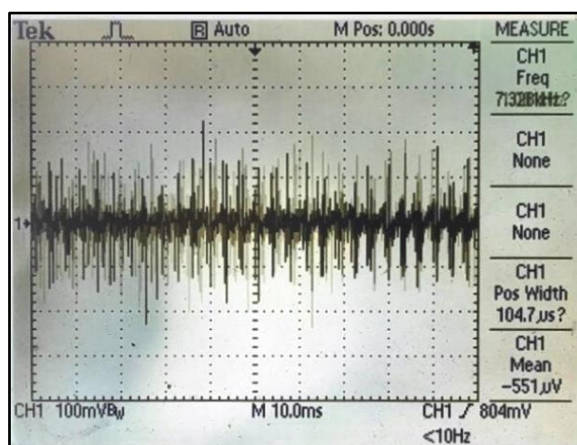
Як видно з осцилограм, приведених на рис. 4.22, впровадження резонансних перетворювачів у випрямляючих модулях ДБЖ забезпечило зниження рівня психофотометричного шуму завад, а отже, підвищило якість електропостачання в порівнянні зі звичайними ШІМ-перетворювачами. Це надзвичайно важливо при використанні запропонованих випрямляючих модулів з резонансними перетворювачами для живлення обладнання телекомунікаційних комплексів, в яких здійснюється опрацювання звукових частот в режимі реального часу.



a)



б)



в)

Рисунок 4.22 – Осцилограми сигналів на виходах випрямляючих модулів з застосуванням звичайних ШІМ-перетворювачів (зліва) та резонансних перетворювачів (справа): а) при відсутності навантаження; б) при навантаженні 10 А; в) при навантаженні 20 А

Загальний вигляд експериментальної установки модульного джерела безперебійного живлення, яка підключена до програми дистанційного моніторингу, показано на рис. 4.23.

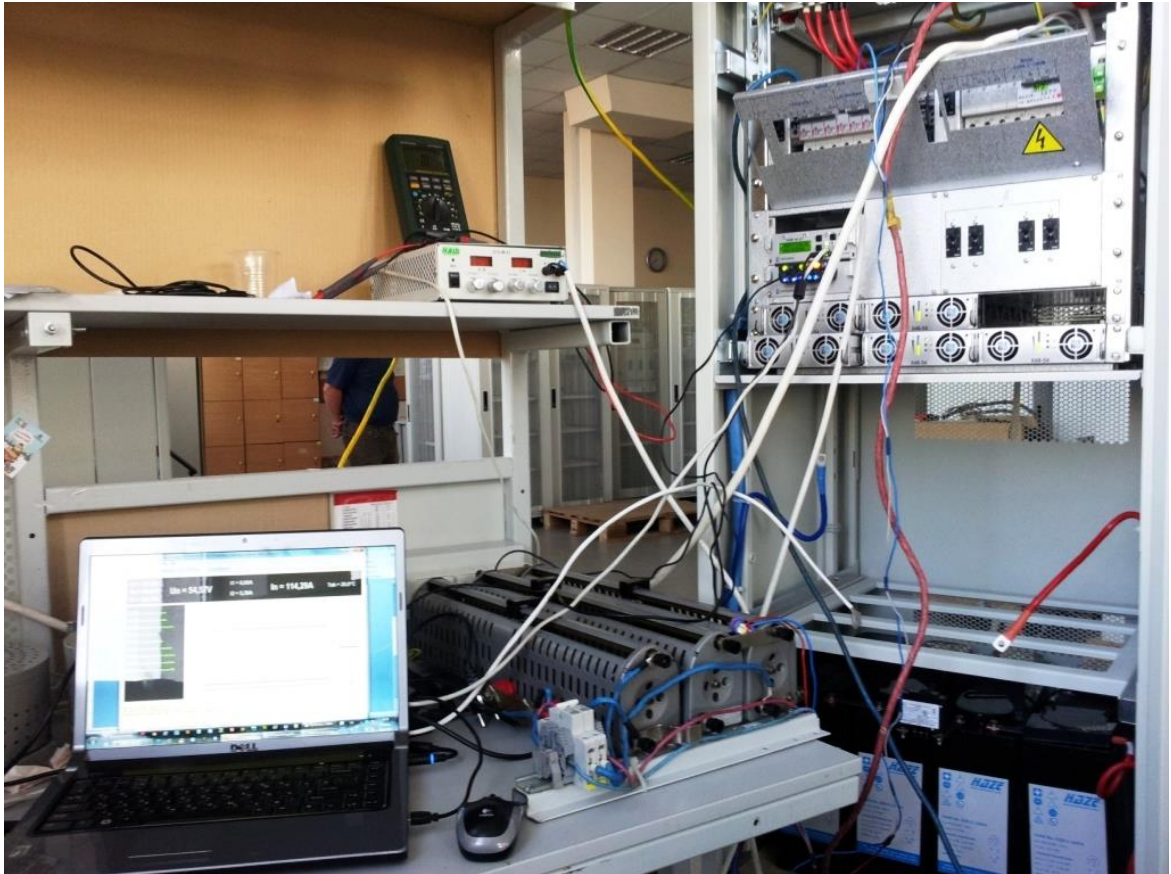


Рисунок 4.23 – Загальний вигляд експериментальної установки для дослідження комп'ютеризованої системи керування та моніторингу ДБЖ

Для імітації споживання електроенергії телекомунікаційним обладнанням було розроблено стенд (рис. 4.24), який дає можливість змінювати навантаження в широкому діапазоні значень. Процес зміни рівня навантаження може відбуватися в кількох режимах – періодичному та випадковому. Для цього в мікроконтролері, який здійснює керування роботою стенду передбачена функція генерації випадкових чисел.

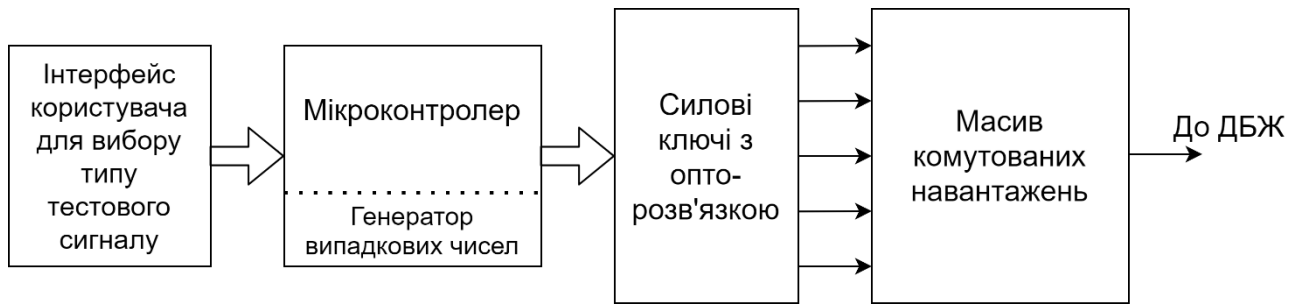


Рисунок 4.24 – Структурна схема стенду для імітації зміни навантаження ДБЖ

КСКМ джерела безперебійного живлення, розроблена в процесі виконання дисертаційної роботи, може працювати в таких основних режимах:

- режим обмеження вихідного струму;
- режим заряду АБ;
- режим роботи від АБ;
- режим тестування АБ;
- режим енергоефективного керування випрямлячами.

Режим обмеження вихідного струму настає у випадку, коли сумарний струм в колі навантаження і струм заряду в колі акумуляторних батарей перевищує максимальний вихідний струм пристрою. В цьому режимі вихідна напруга ДБЖ падає до рівня, при якому струм в колі навантаження і АБ не стане рівним пороговому значенню струму обмеження.

4.5.2 Експериментальні дослідження роботи комп'ютеризованої системи в режимі заряду акумуляторних батарей

В режимі заряду акумуляторних батарей здійснюється вимірювання струмів заряду, яке порівнюється з наперед заданим значенням. Якщо струм заряду перевищує встановлений, то мікроконтролером генерується керуючий сигнал, який подається на входи випрямлячів, що призводить до зменшення вихідної напруги до рівня, при якому струм заряду не стане рівним або меншим

за виставлений. Струм заряду акумуляторних батарей не залежить від струму навантаження.

Під час заряду акумуляторних батарей в режимі “U” вихідна напруга ДБЖ поступово плавно збільшується, підтримуючи постійний струм заряду до того моменту, коли струм заряду АБ не почне знижуватись (рис. 4.25а).

В процесі заряду акумуляторних батарей в режимі “IU” вихідна напруга ДБЖ плавно збільшується до максимальної напруги, яка в даній системі становить 57 В. Після цього напруга постійного заряду знижується до нормального рівня в залежності від температури АБ (рис. 4.25б).

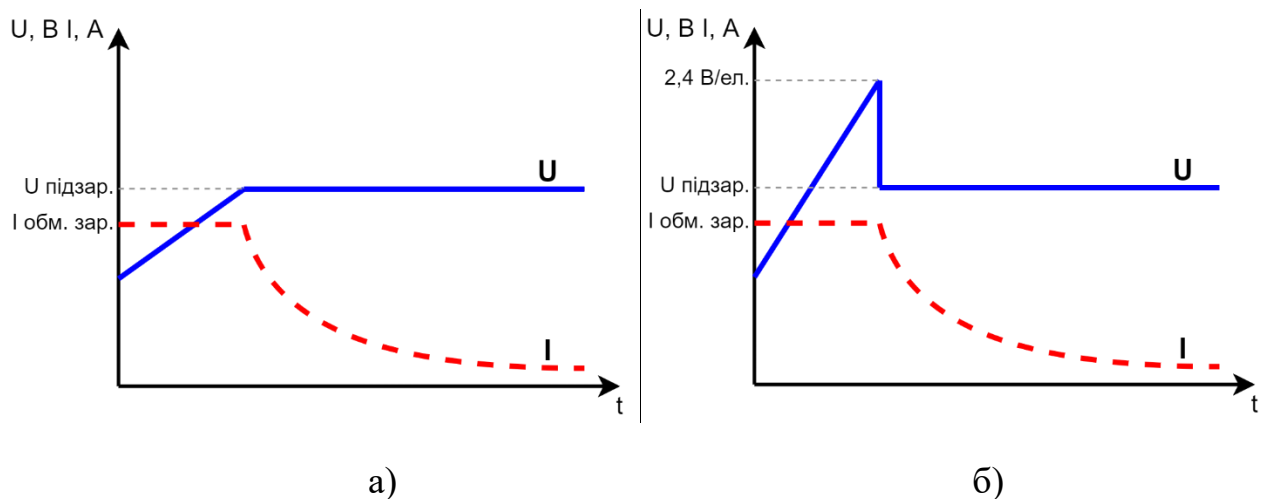


Рисунок 4.25 – Графік заряду АБ: а) в режимі U; б) в режимі IU

В комп’ютеризованій системі керування та моніторингу ДБЖ передбачено вимірювання температури акумуляторних батарей для керування вихідною напругою ДБЖ в процесі заряду АБ з врахуванням їх температури. Вихідна напруга регулюється в залежності від значення температури акумуляторних батарей по формулі:

$$U_{OUT} = U_{20^{\circ}\text{C}} + (20 - T_{AB}) \cdot \frac{\Delta U}{\Delta T} \cdot K_{\theta}, \quad (4.1)$$

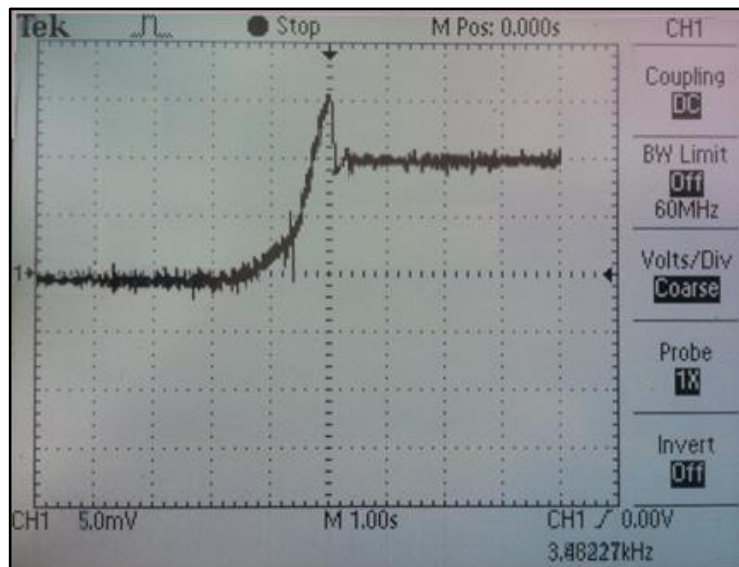
де U_{OUT} – вихідна напруга ДБЖ в паралельному режимі роботи з акумуляторними батареями, $U_{20^{\circ}\text{C}}$ – напруга, яка повинна бути на виході ДБЖ при 20°C в паралельному режимі роботи з АБ (визначається технічними характеристиками АБ), T_{AB} – температура акумуляторних батарей, $\frac{\Delta U}{\Delta T}$ – коефіцієнт термокомпенсації, K_6 – кількість банок в АБ.

Метод керування вихідною напругою ДБЖ з врахуванням температури АБ забезпечує максимально коректний режим заряду акумуляторних батарей. У випадку виникнення неполадок у загальній електромережі, навантаження живиться від АБ. Якщо значення напруги на виході АБ опустилось нижче допустимого рівня, вона відключається від навантаження, поки не з'явиться вхідна напруга змінного струму.

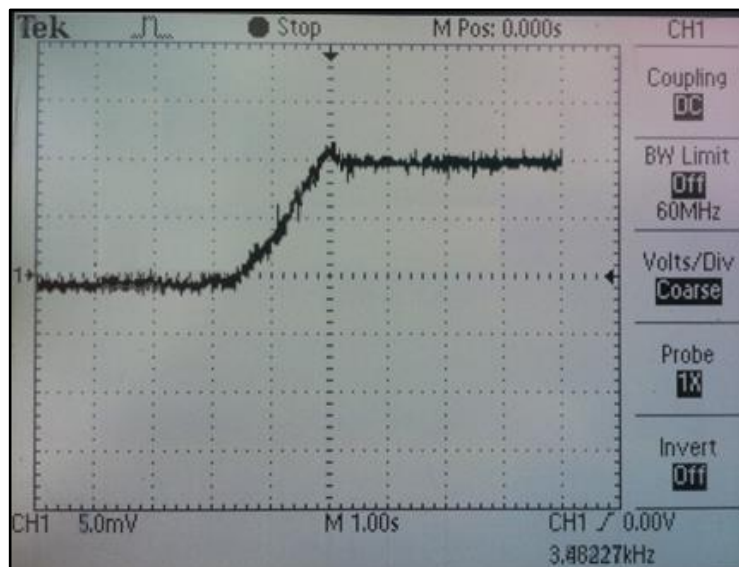
На осцилограмах, приведених на рис. 4.26, представлені експериментальні результати роботи системи керування дослідного взірця ДБЖ в режимі регулювання струму заряду акумуляторних батарей. Вимірювання здійснювались в момент подачі вхідної напруги ДБЖ після тридцяти хвилин роботи в автономному режимі від АБ для живлення навантаження потужністю 3 кВт. На осцилограмах відображається крива зміни спаду напруги на шунті, що використовується для вимірювання струму в колі АБ.

На рис. 4.26а зображена динаміка зміни струму АБ, величина якого управляється ЦКМ з використанням звичайного ПІД-регулятора, налаштованого під інший тип АБ. Як видно з цієї осцилограми, в перехідному процесі має місце короткочасний стрибок струму вище порогового рівня, що негативно впливає на стан акумуляторних батарей.

На рис. 4.26б зображений результат процесу керування струмом заряду АБ, який здійснюється з застосуванням запропонованого методу адаптивного вибору ПІД-коефіцієнтів з використанням ШНМ. З осцилограми видно, що процес збільшення струму заряду АБ відбувається плавно, практично без перерегулювання.



а)



б)

Рисунок 4.26 – Осцилограми динаміки зміни струму заряду АБ I_{AB} в момент подачі вхідної напруги з використанням: а) налаштованого ПД-регулятора; б) запропонованого методу адаптивного вибору ПД-коефіцієнтів з застосуванням ШНМ

Отримані результати проведених досліджень демонструють ефективність запропонованого методу адаптивного ПД-регулювання процесу заряду акумуляторних батарей на основі використання штучної нейронної мережі, який запропонований та описаний в третьому розділі дисертаційної роботи.

4.5.3 Експериментальні дослідження роботи комп'ютеризованої системи в режимі енергоефективного керування випрямлячами

На основі запропонованих в другому розділі дисертаційної роботи методів адаптивного регулювання рівня завантаженості та методу циклічного зміщення активних випрямляючих модулів був реалізований режим енергоефективного керування випрямлячами (РЕКВ). Його суть полягає в почерговому включенні / виключенні випрямляючих модулів в залежності від значення коефіцієнта їх завантаженості і призначений для рівномірного їх напрацювання на відмову і, відповідно, для підвищення надійності системи. Крім того, він сприяє економії споживання електроенергії. Структурна схема системи керування випрямляючими модулями ДБЖ показана на рис. 4.27.

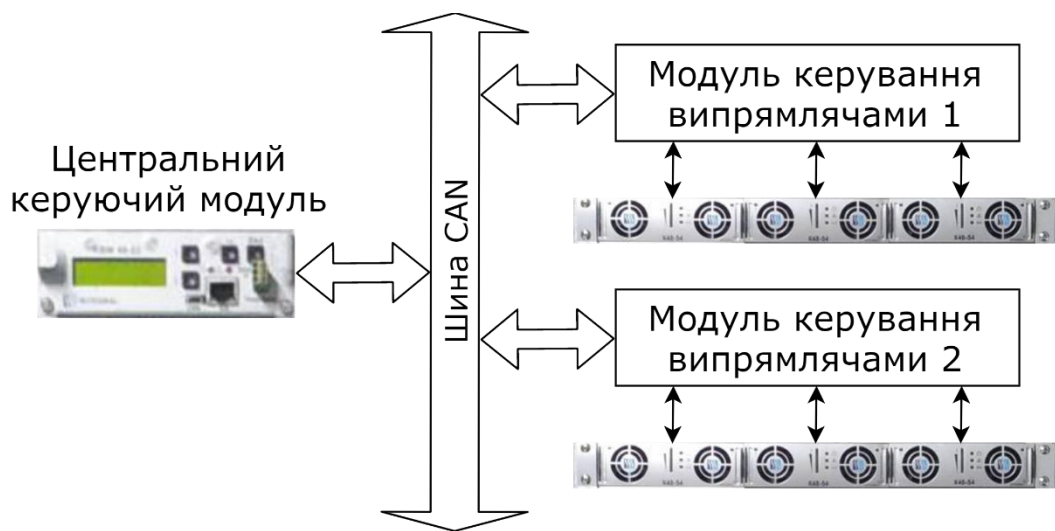


Рисунок 4.27 – Структурна схема системи керування випрямляючими модулями ДБЖ

Режим енергоефективного керування випрямлячами можна увімкнути чи вимкнути в меню центрального керуючого модуля або в програмі дистанційного моніторингу (див. рис. 4.17). Після запуску РЕКВ всі модулі залишаються у ввімкненому стані протягом проміжку часу, який заданий в налаштуваннях ЦКМ. Після закінчення цього періоду мікроконтролер центрального керуючого

модуля відключає певну кількість модулів, відповідно до алгоритму, який описаний в п. 4.4.1.2 (рис. 4.11).

Система рахує скільки модулів потрібно залишити ввімкненими, щоб коефіцієнт завантаженості випрямлячів K_{load} знаходився в межах від K_{min} до K_{max} , що відповідає відповідно мінімальному та максимальному пороговому значенню коефіцієнта завантаженості випрямлячів. Якщо K_{load} перевищить значення K_{max} , то центральний керуючий модуль підключить додатково стільки випрямлячів, скільки потрібно для зниження коефіцієнта їх завантаженості нижче рівня K_{max} . Якщо K_{load} стане нижчим за значення K_{min} то центральний керуючий модуль відключить ще таку кількість випрямлячів, яка потрібна для підвищення коефіцієнта їх завантаженості вище рівня K_{min} .

РЕКВ відключається у таких випадках:

- примусовому відключенні (за допомогою меню ЦКМ або ПДМ);
- при наявності хоча б одного аварійного стану;
- при заниженій напрузі вхідної мережі хоча б на одній з трьох фаз.

У випадку, якщо один або більше випрямляючих модулів відключається для реалізації енергоефективного керування, запускається процес зміщення ввімкнених навантажених випрямлячів джерела безперебійного живлення, який схематично зображений на рис. 4.28. Два перші випрямляючі модулі на початковому етапі знаходяться у ввімкненому стані а усі інші – у вимкненому (рис. 4.28а). Цикл зміщення починається шляхом ввімкнення одного додаткового випрямляча (рис. 4.28б). Через 20 секунд, після підтвердження того, що новий випрямляючий модуль включився, перший випрямляч вимикається (рис. 4.28в). Після цього, процес зміщення випрямлячів ДБЖ переходить в режим очікування на період часу, значення якого задається в параметрах налаштувань і по замовчуванню становить 24 години. Після закінчення цього етапу процес повторюється з наступним випрямляючим модулем і т.д.

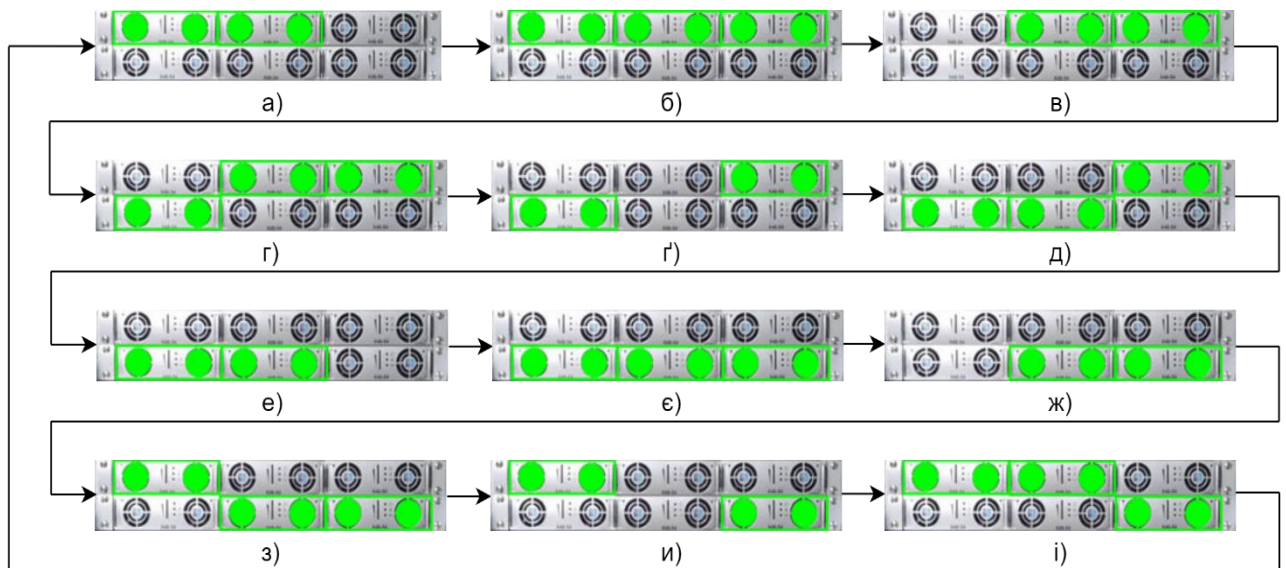


Рисунок 4.28 – Процес зміщення ввімкнених навантажених випрямлячів модульного джерела безперебійного живлення

В системі передбачені два режими роботи енергоефективного керування випрямляючі модулями: робочий режим і режим тестування. Різниця між ними полягає в тривалості переходу між етапами зміщення випрямлячів. В режимі тестування використовуються хвилини замість годин для заданої тривалості часових параметрів в налаштуваннях.

В результаті експериментальних досліджень (рис. 4.29) було встановлено, що застосування запропонованого методу адаптивного регулювання рівня завантаженості випрямляючих модулів джерела безперебійного живлення в межах наперед заданого оптимального діапазону значень (крива 1) підвищує ККД джерела безперебійного живлення на 3-4 % в порівнянні з традиційними методами керування компонентами ДБЖ, які характеризуються низьким рівнем завантаженості (крива 2).

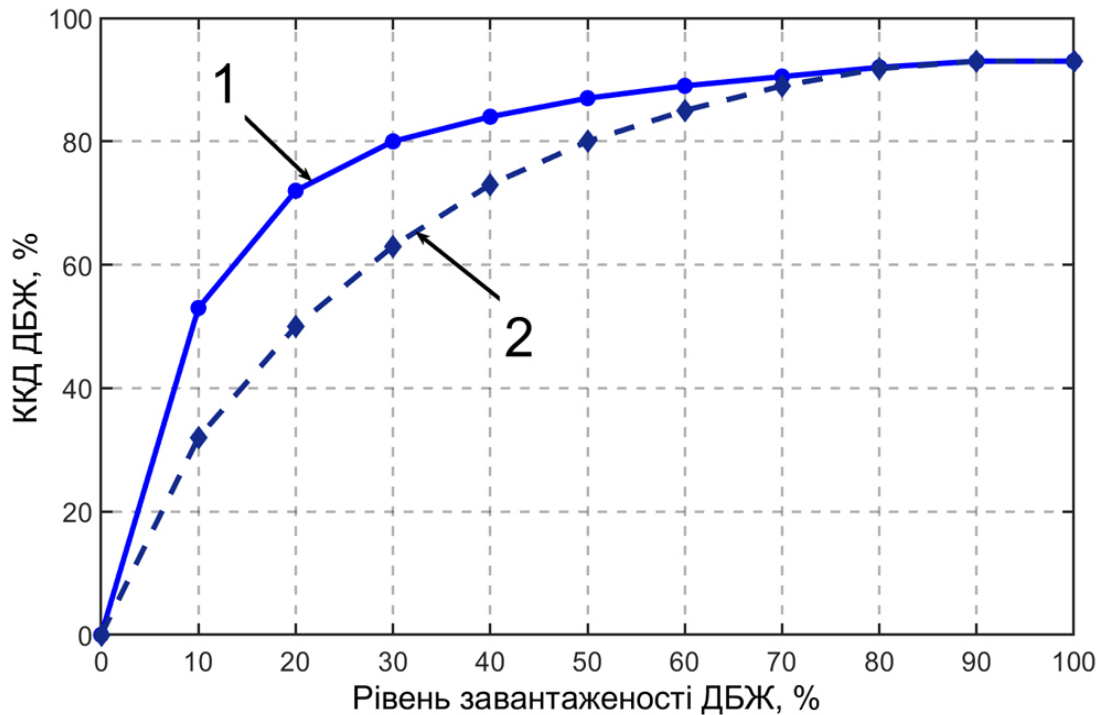


Рисунок 4.29 – ККД джерела безперебійного живлення при застосуванні різних методів керування випрямляючими модулями

4.6 Висновки до розділу 4

Відповідно до результатів проведених досліджень, які описані в четвертому розділі, можна зробити такі висновки:

1. Розроблено оригінальну комп'ютеризовану систему керування та моніторингу джерел безперебійного живлення, яка характеризується адаптивністю, що дозволяє забезпечити ефективніший процес управління компонентами системи безперебійного живлення та її вихідними параметрами при стохастичних змінах навантаження.

2. Розроблене алгоритмічне, апаратне та програмне забезпечення для системи керування та моніторингу стану джерел безперебійного живлення на основі запропонованих моделей та методів управління, яке характеризується застосуванням керуючих алгоритмів з елементами прогнозування.

3. Застосовано метод адаптивного регулювання рівня завантаженості випрямляючих модулів джерела безперебійного живлення в межах наперед

заданого оптимального діапазону значень, який дозволив знизити втрати від роботи випрямляючих модулів та підвищити таким чином енергоефективність ДБЖ.

4. Реалізовано метод керування випрямляючими модулями джерела безперебійного живлення шляхом адаптивного циклічного зміщення активних випрямлячів, який дав змогу підвищити показник середнього часу напрацювання на відмову.

Основні наукові результати викладені в четвертому розділі, опубліковані в роботах автора [2, 11–13, 16, 17].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу, яка полягає в розробці нових і вдосконаленні існуючих методів та засобів покращення технічних характеристик інтелектуальних систем безперебійного живлення для телекомунікаційних комплексів. Дана задача розв'язана з метою підвищення енергоефективності та надійності роботи джерел безперебійного живлення. Проведені в дисертаційній роботі дослідження дали змогу отримати наукові висновки і практичні результати, які полягають у наступному:

1. В результаті огляду та аналізу сучасних комп'ютеризованих систем керування та моніторингу джерел безперебійного живлення показано, що одним з найперспективніших напрямків вдосконалення існуючих систем керування ДБЖ є розробка нових моделей та методів управління та діагностики з їх впровадженням у вигляді програмно-апаратних модулів цієї системи для покращення показників надійності та енергоефективності ДБЖ.

2. Розроблено імітаційну модель системи управління компонентами джерела безперебійного живлення, яка, за рахунок врахування стохастичності зміни споживання електроенергії телекомунікаційним обладнанням, імітації зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів на функціонування ДБЖ, дала змогу дослідити їх вплив та покращити якість показників електропостачання.

3. Удосконалено метод адаптивного регулювання рівня завантаженості випрямляючих модулів джерела безперебійного живлення в межах наперед заданого оптимального діапазону значень, який відрізняється від відомих можливістю зміни кількості навантажених випрямлячів в режимі реального часу, що дало змогу знизити втрати від роботи випрямляючих модулів та підвищити, таким чином, енергоефективність ДБЖ на 3-4 %.

4. Удосконалено метод керування випрямляючими модулями джерела безперебійного живлення шляхом адаптивного циклічного зміщення активних випрямлячів, що дало змогу підвищити показник надійності системи живлення, зокрема, середній час напрацювання на відмову на 5-8 %, без зниження показників енергоефективності.

5. Розроблено метод керування компонентами джерел безперебійного живлення на основі використання нейромережевих технологій, який відрізняється від існуючих застосувань адаптивного ПД-регулювання процесу заряду акумуляторних батарей та короткострокового прогнозування споживання електроенергії, що дало змогу за рахунок ефективнішого управління покращити технічні характеристики системи безперебійного живлення при стохастичних змінах навантаження.

6. Виконано практичне впровадження результатів дисертаційної роботи шляхом розробки на основі запропонованих моделей, методів та засобів апаратного, алгоритмічного та програмного забезпечення компонентів комп'ютеризованої системи керування та моніторингу джерел безперебійного живлення, що підтвердило ефективність запропонованих теоретичних рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Palamar A., Pettai E., Beldjajev V. Control System for a Diesel Generator and UPS Based Microgrid. *Electrical, Control and Communication Engineering, Riga, Latvia*. 2010. Vol. 26, No. 1. P. 48–53.
2. Palamar A., Karpinskyy M., Vodovozov V. Design and Implementation of a Digital Control and Monitoring System for an AC/DC UPS. *7th International Conference-Workshop «Compatibility and Power Electronics» (CPE 2011), Tallinn, Estonia*. 2011. P. 173–177.
3. Palamar A. Control system simulation by modular uninterruptible power supply unit with adaptive regulation function. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, Ternopil, Ukraine*. 2020. Vol. 2, No. 98. P. 129–136.
4. Palamar A. Methods and means of increasing the reliability of computerized modular uninterruptible power supply system. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, Ternopil, Ukraine*. 2020. Vol. 3, No. 99. P. 133–141.
5. Паламар М., Пастернак Ю., Паламар А. Дослідження динамічних похибок системи прецизійного керування антеною з асинхронним електроприводом. *Вісник ТНТУ. Тернопіль: ТНТУ*. 2014. Вип. 4, № 76. С. 164–173.
6. Vasylykivskyi I., Ishchenko V., Pohrebennyk V., Palamar M., Palamar A. System of water objects pollution monitoring. *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2017), Vienna, Austria*. 2017. Vol. 17, No. 33. P. 355–362.
7. Паламар М. І., Паламар А. М. Система керування і моніторингу пристроїв гарантованого електроживлення. *Праці II Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми й перспективи», Тернопіль*. 2005. С. 135–139.

8. Palamar A., Pettai E. Microgrid for the Department of Electrical Drives and Power Electronics. *8th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering» and «Doctoral School of Energy and Geotechnology II»*, Pärnu, Estonia. 2010. P. 54–61.
9. Palamar A., Laugis J. Control System for Multiple Buildings Microgrid. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій»*, Тернопіль. 2010. P. 376–377.
10. Palamar A., Pettai E. Control Algorithm for a Diesel Generator Based Microgrid in Different Operation Modes. *9th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering» and «Doctoral School of Energy and Geotechnology II»*, Pärnu, Estonia. 2010. P. 89–94.
11. Palamar A., Karpinskyu M. Control of an Uninterruptible Power Supply in a DC Microgrid System. *10th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering» and «Doctoral School of Energy and Geotechnology II»*, Pärnu, Estonia. 2011. P. 80–84.
12. Паламар А. М., Пастернак Ю. В. Модуль керування пристроєм гарантованого електроживлення постійного струму. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»: збірник тез доповідей*, Тернопіль. 2013. С. 217.
13. Паламар А. М., Пастернак Ю. В., Паламар Я. М. Двох-процесорна інформаційно-вимірювальна система керування пристроєм безперебійного електроживлення. *Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»: збірник тез доповідей*, Тернопіль. 2014. С. 211–212.
14. Паламар А. М., Осов'як І. І. Комп'ютерна інформаційно-вимірювальна система для моніторингу пристроїв безперебійного електроживлення. *Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми, перспективи»*. 2015. С. 111–112.

15. Паламар А. М., Паламар М. О. Методи та засоби підвищення енергоефективності джерел безперебійного живлення для телекомунікаційних систем. *Матеріали XIX наукової конференції ТНТУ ім. І.Пулюя, Тернопіль*. 2016. С. 169–170.
16. Паламар А. М. Комп'ютерна система для моніторингу параметрів джерел безперебійного живлення на основі технології Internet of Things. *Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій», Тернопіль*. 2019. С. 208–209.
17. Паламар А. М. Програмно-апаратний комплекс для дистанційного моніторингу стану джерел безперебійного електроживлення. *Матеріали VII науково-технічної конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «Інформаційні моделі, системи та технології», Тернопіль*. 2019. С. 132.
18. Паламар А. М. Моделювання алгоритму керування модульним джерелом безперебійного живлення з використанням діаграми станів. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 60 річчя з дня заснування ТНТУ та 175 річчя з дня народження Івана Пулюя, Тернопіль*. 2020. С. 172–173.
19. Паламар А. М. Функціональна схема інтелектуальної системи моніторингу джерел безперебійного живлення. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти, Рівне*. 2020. С. 141–143.
20. Паламар А. М. Метод керування системою безперебійного живлення на основі прогнозування з використанням рекурентної нейронної мережі. *Матеріали IX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь у світі сучасних технологій» за тематикою: «Використання інформаційних та комунікаційних технологій в сучасному цифровому суспільстві», Херсон*. 2020. С. 153–155.

21. Palamar A. Intelligent control and monitoring module for uninterruptible power supply system. *II International Scientific and Practical Conference «Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs» (MC&FPGA-2020), Kharkiv, Ukraine. 2020. P. 12–13.*
22. Паламар А. М., Паламар М. О. Метод підвищення надійності компонентів модульної комп'ютеризованої системи безперебійного живлення. *Матеріали міжнародної наукової конференції «Іван Пулюй: життя в ім'я науки та України» (до 175-ліття від дня народження). 2020. С. 91–92.*
23. Palamar M. I., Karpinskyu M. P., Palamar A. M. Neural network use in control system of antenna complex for information receive of earth remote sensing. *Електронне наукове фахове видання «Науковий вісник Донбасу»: Технічні науки. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://nvd.luguniv.edu.ua/archiv/NN6/08pmiers.pdf>. 2008. Вип. 6, № 2.*
24. Palamar M., Pasternak Y., Palamar A., Poikhalo A. Precision tracking of the trajectory LEO satellite by antenna with induction motors in the control system. *Proceedings of the 2017 IEEE 9th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2017), Bucharest, Romania. 2017. Vol. 2. P. 1051–1055.*
25. Завербний А. С., Псуй М. С., Керницький І. С. Світові тенденції розвитку енергетики та потенційні можливості для підвищення рівня енергетичної безпеки України в умовах інтегрування її енергетичного сектору. *Соціально-правові студії. 2018. № 1. С. 121–127.*
26. Basso T., Hambrick J., DeBlasio D. Update and review of IEEE P2030 smart grid interoperability and IEEE 1547 interconnection standards. *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, ISGT 2012. 2012. P. 1–7.*
27. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». 2017.
28. Якименко Ю. І., Прокопенко В. В., Денисюк С. П., Закладний О. М. Smart системи як одна із основних складових сталого розвитку енергетики. *Енергетика: економіка, технології, екологія. 2012. № 1. С. 4–13.*

29. Buchholz B. M., Styczynski Z. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer, 2014. 396 p.
30. Стогній Б. С., Кириленко О. В., Праховник А. В., Денисюк С. П. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 5. С. 52–67.
31. Эрк А. Ф., Судаченко В. Н., Тимофеев Е. В., Размук В. А. Обоснование технологии «Умных сетей» для электроснабжения интенсивных машинных технологий на сельскохозяйственных предприятиях. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018. Вып. 10, № 3. С. 20–27.
32. Манусов В. З., Хасанзода Н. Построение холонической инфраструктуры интеллектуальных сетей в концепции Smart Grid с учетом двустороннего потока энергии. *Проблемы региональной энергетики*. 2017. Вып. 35, № 3. С. 84–93.
33. Chhaya L. K., Sharma P., Kumar A., Bhagwatikar G. Cross Layer Optimization and Simulation of Smart Grid Home Area Network. *Modelling and Simulation in Engineering*. 2018. Vol. 2018. P. 1–15.
34. Andrén F. P., Strasser T. I., Kastner W. Engineering smart grids: Applying model-driven development from use case design to deployment. *Energies*. 2017. Vol. 10, No. 3. P. 1–33.
35. Eltamaly A. M., Mohamed M. A., Al-Saud M. S., Alolah A. I. Load management as a smart grid concept for sizing and designing of hybrid renewable energy systems. *Engineering Optimization*. 2017. Vol. 49, No. 10. P. 1813–1828.
36. Tuballa M. L., Abundo M. L. A review of the development of Smart Grid technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 59. P. 710–725.
37. Калашников В. И., Ткаченко С. Н., Хижняк П. А. Автономные микрогрид-системы с возобновляемыми источниками энергии, как элемент концепции Smart Grid. Перспективы развития. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2015. Вып. 12, № 1121. С. 374–378.

38. Скурихина К. А., Арестова А. Ю., Армеев Д. В.-вич. Исследование динамических свойств Microgrid при параллельной работе с энергосистемой. *Вестник науки Сибири. Спецвыпуск*. 2015. Вып. 15. С. 93–102.
39. Parhizi S., Lotfi H., Khodaei A., Bahramirad S. State of the Art in Research on Microgrids: A Review. *IEEE Access*. 2015. Vol. 3. P. 890–925.
40. Колесник В. В., Хижняк Т. А. Імітаційне моделювання як основа для побудови алгоритмів керування системами електроживлення Microgrid. *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2013. Вып. 8, № 114. С. 164–167.
41. Кириленко О. В., Денисюк С. П. Сучасні тенденції побудови та керування режимами електроенергетичних мереж. *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2016. Вып. 4, № 147. С. 82–94.
42. Киселева А. Г. Обработка контекстных данных в системах управления преобразователями электроэнергии в микрогрид. *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2013. Вып. 8, № 114. С. 168–171.
43. Mohd A., Ortjohann E., Schmelter A., Hamsic N., Morton D. Challenges in integrating distributed energy storage systems into future smart grid. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2008. P. 1627–1632.
44. Дзюба А. П. Использование накопителей электроэнергии в качестве инструментов управления спросом на электропотребление. *Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки»*. 2019. Вып. 5, № 2. С. 228–238.
45. Mardani F., Falconar N., Shafiei N., Akel N., Khandekar R., Pahlevani M. A Digital Control System for UPS Systems with Smart-Grid Capability. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2019. P. 1–17.
46. Сокольникова Т. В., Суслов К. В., Ломбарди П. Определение оптимальных параметров накопителя для интеграции возобновляемых источников энергии в изолированных энергосистемах с активными потребителями.

- Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. Вып. 105, № 10. С. 206–211.
47. Guerrero J. M., Member S., Hang L., Uceda J. Control of Distributed Uninterruptible Power Supply Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. Vol. 55, No. 8. P. 2845–2859.
 48. Zhao B., Song Q., Liu W., Xiao Y. Next-generation multi-functional modular intelligent UPS system for smart grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013. Vol. 60, No. 9. P. 3602–3618.
 49. Андреев А. И., Банзак О. В. Джерела безперебійного живлення телекомунікаційних і комп'ютерних систем: навч. посіб. Одеса:2010. 196 с.
 50. Aamir M., Kalwar K. A., Mekhilef S. Review: Uninterruptible Power Supply (UPS) system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 58. P. 1395–1410.
 51. Воробев А. Ю. Электроснабжение компьютерных и телекоммуникационных систем. Москва:Эко-Трендз, 2003. 280 с.
 52. Гуревич В. Источники бесперебойного электропитания: устройство, принципы действия и применение. *Силовая Электроника*. 2012. № 6. С. 63–70.
 53. Маккарти К. Сравнение различных схематических конфигураций систем ИБП. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.aboutdatacenter.ru/docs/APC/4/WP75_RU.pdf. 2004.
 54. Толубко В. Б., Афанасьев П. В., Бондаренко В. М., Трембовецкий М. П., Уварова Т. В. Побудова систем гарантованого електроживлення телекомунікаційної апаратури. *Зв'язок*. 2016. № 5. С. 50–53.
 55. Расмуссен Н. Различные типы систем бесперебойного питания. *Современная электроника*. 2014. № 2. С. 44–47.
 56. Карпиленко Ю., Карлов С. Источник бесперебойного питания ИСТОК серии ИДП-3М. *Силовая электроника*. 2014. № 4. С. 60–62.

57. Racine M. S., Parham J. D., Rashid M. H. An overview of uninterruptible power supplies. *Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium, 2005*. 2005. P. 159–164.
58. Терентьев А. М. Актуальные проблемы бесперебойного электропитания персональных компьютеров и серверов. *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2013. Вып. 30, № 219. С. 46–53.
59. Emadi A., Nasiri A., Bekiarov S. B. *Uninterruptible Power Supplies and Active Filters*. CRC Press LLC, 2005. 272 p.
60. Bekiarov S. B., Emadi A. Uninterruptible Power Supplies: Classification, Operation, Dynamics, and Control. *APEC. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 2002. P. 597–604.
61. Uninterruptible power systems (UPS) -- Part 3: Method of specifying the performance and test requirements (IEC 62040-3:2011 (EQV)). 2011.
62. Емеличев А. А. Стабилизация параметров источников бесперебойного питания. *Сервис в России и за рубежом*. 2009. № 2. С. 47–52.
63. Душин В. К., Саморуков И. И., Теодорович Н. Н., Феокистов А. Н. Системы бесперебойного питания локальных вычислительных сетей. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2006. Вып. 2, № 2. С. 19–22.
64. Mardani F., Falconar N., Akel N., Khandekar R., Goncalves V., Pahlevani M. A nonlinear adaptive control system for UPS systems. *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*. 2019. P. 1843–1847.
65. Pilat N., Peric A., Ban Ž., Šunde V. Analysis of the uninterruptible power supply influences to the power grid. *2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO 2019 - Proceedings*. 2019. P. 180–185.
66. Rahmat M. K., Karim A. Z. A., Salleh M. N. M. Sensitivity Analysis of the AC Uninterruptible Power Supply (UPS) Reliability. *International Conference on Engineering Technology and Technopreneurship (ICE2T)*. 2017. P. 1–6.

67. Денисенко Е. А., Тарасов М. М., Кривошей А. А., Бондарчук А. В. Источники бесперебойного и автономного электроснабжения. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2016. Вып. 115, № 1. С. 1–13.
68. Abusara M. A., Guerrero J. M., Sharkh S. M. Line-interactive UPS for microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014. Vol. 61, No. 3. P. 1292–1300.
69. Murrill M., Sonnenberg B. J. Evaluating the Opportunity for DC Power in the Data Center. *Emerson Network Power White Paper*. 2011. P. 1–10.
70. Gruzis T. M., Hall J. AC, DC or Hybrid Power Solutions for Today's Telecommunications Facilities. *INTELEC. Twenty-Second International Telecommunications Energy Conference*. 2000. P. 361–368.
71. Соловьев А. Качественное энергообеспечение РА ЦОДа. *Век качества*. 2010. № 5. С. 2010.
72. Григораш О. В., Чумак М. С., Кривошей А. А. Концепция построения систем бесперебойного электроснабжения. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2016. Вып. 119, № 05. С. 1–21.
73. Артюшенко В. М., Аббасова Т. С., Шляхтин С. А. Повышение качества электропитания в автоматизированной системе контроля и учета электроэнергии. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2008. С. 3–15.
74. Дулепов Д. Е., Тюндина Т. Е. Качество и надежность электроснабжения в инфокоммуникационных системах. *Карельский научный журнал*. 2015. № 2 (11). С. 115–120.
75. Григораш О. В., Божко С. В., Нормов Д. А., Безуглый С. М., Ракло А. В. Модульные системы гарантированного электроснабжения. Краснодар:КВВАУЛ, 2005. 306 с.
76. Wiboonrat M. Data center design of optimal reliable systems. *2011 IEEE International Conference on Quality and Reliability, ICQR 2011*. 2011. P. 350–354.

77. Кузнєцов Д. С. Визначення вимог до профілактичного технічного обслуговування джерела безперебійного електроживлення центру обробки даних. *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали II Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2012, 4-5 травня*. 2012. С. 31–33.
78. Saro L., Zanettin C. The impact of a single module's MTBF value in Modular UPS Systems: technique for its assessment, improvement and final validation. *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. 2016. P. 1–8.
79. Рогулина Л. Г. Анализ надежности систем электропитания телекоммуникационного оборудования. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2010. Вып. 3, № 16. С. 698–703.
80. Борисевич А. В., Дякин Н. В. Полумарковская модель для оценки показателей надежности источника бесперебойного питания дата-центра. *Современные научные исследования и инновации*. 2015. Вып. 1, № 8. С. 23–27.
81. Шляхтин С. А., Аббасова Т. С. Методы увеличения коэффициента готовности в системах бесперебойного электропитания. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2008. Вып. 4, № 1. С. 16–18.
82. Волочій Б. Ю., Кузнєцов Д. С. Модель для надійнісного проектування джерел безперебійного електроживлення радіоелектронних інформаційних систем цілодобової довготривалої експлуатації. *Радиоелектроника и информатика*. 2012. № 2. С. 36–42.
83. Волочій Б. Ю., Кузнєцов Д. С. Визначення умов переходу від стратегії оперативного відновлення джерела безперебійного електроживлення до стратегії планового відновлення. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2014. № 796. С. 214–221.

84. Волочий Б. Ю., Кузнецов Д. С. Проектування відмовостійких систем з конфігураціями $N+M$ та $2 \times (N+M)$ для джерел безперебійного електроживлення. *Національний університет «Львівська політехніка»*. 2012. № 738. С. 216–223.
85. Волочий Б. Ю., Кузнецов Д. С. Порівняння стратегій профілактичного та аварійного відновлення джерела безперебійного електроживлення. *Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2013. № 54. С. 111–119.
86. Волочий Б. Ю., Кузнецов Д. С. Проектування відмовостійких систем для джерел безперебійного електроживлення. *Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2012. № 48. С. 149–158.
87. Волочий Б. Ю., Озіровський Л. Д., Муляк О. В., Гила В. Д. Моделі для надійнісного проектування вузла пам'яті сервера та джерела безперебійного електроживлення. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2010. № 680 : *Радіоелектроніка та телекомунікації*. С. 206–216.
88. Мандзий Б. А., Волочий Б. Ю., Кузнецов Д. С. Надежностное проектирование отказоустойчивых систем с комбинированным структурным резервированием для источников бесперебойного электропитания. *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2012. № 1.
89. Мандзий Б. А., Волочий Б. Ю., Озирковский Л. Д., Кузнецов Д. С. Сравнение надежности источников бесперебойного электропитания с нагруженными и ненагруженными резервными модулями. *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2013. № 1.
90. Мандзий Б. А., Волочий Б. Ю., Озіровський Л. Д., Кузнецов Д. С., Кулик І. В. Дослідження впливу профілактичного технічного обслуговування на надійність відмовостійкого джерела безперебійного електроживлення. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. Вип. 8, № 1. С. 8–12.

91. Артюшенко В. М., Аббасова Т. С. Особенности резервирования источников бесперебойного питания компьютерного и телекоммуникационного оборудования. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2007. Вып. 3, № 3. С. 20–23.
92. Talapko D. Telecom datacenter power infrastructure availability comparison of DC and AC UPS. *INTELEC, International Telecommunications Energy Conference*. 2012. P. 1–5.
93. Saro L., Zanettin C., Božič V. Reliability Analysis and Calculations for Different Power System Architectures based on Modular UPS. *2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. 2018. P. 1–8.
94. Saro L., Zanettin C., Božič V. Reliability Analysis and Calculation for the Most Common Modular UPS System Architectures. *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. 2017. P. 91–98.
95. Xiaofei Z., Zhen W., Zhou S. How to Ensure the Modular UPS with High Reliability. *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. 2015. No. 1. P. 3–6.
96. Shrestha B. R., Hansen T. M., Tonkoski R. Reliability Analysis of 380V DC Distribution in Data Centers. *IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. 2016. P. 1–5.
97. Shrestha B. R., Tamrakar U., Hansen T. M., Bhattarai B. P., James S., Tonkoski R. Efficiency and Reliability Analyses of AC and 380 v DC Distribution in Data Centers. *Amer. Power Convers., Schnieder Electr., White Paper*. 2018. Vol. 127. P. 63305–63315.
98. Рогулина Л. Г. Автоматизация проектирования систем электропитания для предприятий связи. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2011. Вып. 4, № 17. С. 927–931.
99. Волочій Б. Ю., Озірковський Л. Д., Чопей Р. С., Мащак А. В., Шкілюк О. П. Оцінка надійності програмно-апаратних систем за допомогою моделі їх поведінки. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2014. № 796. С. 222–231.

100. Барсков А. Отказоустойчивые ИБП: модульные или моноблочные? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iksmmedia.ru/articles/2823350-Otkazoustojchivye-IBP-modulnye-ili.html>. 2019.
101. Addabbo T., Fort A., Mugnaini M., Vignoli V. Distributed UPS control systems reliability analysis. *Measurement*. 2017. Vol. 110. P. 275–283.
102. Keiel G., Flores J. V., Pereira L. F., Salton A. T. Discrete-time multiple resonant controller design for uninterruptible power supplies. *IFAC-PapersOnLine*. 2017. Vol. 1, No. 50. P. 6717–6722.
103. Rahmat M. K., Karim A. Z. A., Salleh M. N. M. Uninterruptible Power Supply System Configurations: Reliability & Cost-Benefit Analysis. *2018 IEEE 7th International Conference on Power and Energy (PECon)*. 2018. Vol. 2. P. 252–256.
104. Rahmat M. K., Jovanovic S., Lo K. L. Reliability and Availability Modelling of Uninterruptible Power Supply (UPS) Systems Using Monte-Carlo Simulation. *5th International Power Engineering and Optimization Conference*. 2011. P. 267–272.
105. Аббасова Т. С. Энергетическая эффективность систем электропитания для высокоскоростных телекоммуникационных систем. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2009. Вып. 5, № 2. С. 1–7.
106. Карагодин В. В., Полянский К. А., Горин В. А. Структурно-параметрическая оптимизация системы бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2017. Вып. 60, № 1. С. 14–24.
107. Расмуссен Н. Моделирование эффективности энергопотребления в центрах обработки данных. *Журн. сетевых решений/LAN*. 2007. № 11. С. 40–47.
108. Moreno-Munoz A., la Rosa J. J. G. De, Flores-Arias J. M., Bellido-Outerino F. J., Gil-de-Castro A. Energy efficiency criteria in uninterruptible power supply selection. *Applied Energy*. 2011. Vol. 88, No. 4. P. 1312–1321.

109. Ma H., Gao D. W., Wang B., Liu D. Control Strategy of UPS for Data Center Based on Economic Dispatch. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*. 2018. P. 1–6.
110. Pratt A., Kumar P., Aldridge T. V. Evaluation of 400V DC Distribution in Telco and Data Centers to Improve Energy Efficiency. *INTELEC 07-29th International Telecommunications Energy Conference*. 2007. P. 32–39.
111. Qi S., Sun W., Wu Y. Comparative Analysis on Different Architectures of Power Supply System for Data Center and Telecom Center. *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. 2017. P. 26–29.
112. Wang C., Member S., Jain P. A Quantitative Comparison and Evaluation of 48V DC and 380V DC Distribution Systems for Datacenters. *IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. 2014. P. 1–7.
113. Аббасова Т. С. Повышение энергетической эффективности центров обработки данных для телекоммуникационных систем. *Сервис в России и за рубежом*. 2009. № 2. С. 1689–1699.
114. Wei B., Marzabal A., Ruiz R., Guerrero J. M., Vasquez J. C. DAVIC: A New Distributed Adaptive Virtual Impedance Control for Parallel-Connected Voltage Source Inverters in Modular UPS System. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018. Vol. 34, No. 6. P. 5953–5968.
115. Wei B., Gui Y., Trujillo S., Guerrero J. M., Vasquez J. C. Distributed Average Integral Secondary Control for Modular UPS Systems-Based Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019. Vol. 34, No. 7. P. 6922–6936.
116. Дробот О. А. Комплексна система гарантованого електропостачання для інфокомунікаційного обладнання з використанням нетрадиційних і відновлювальних джерел електроенергії. *Системи обробки інформації*. 2011. Вип. 8. С. 63–66.
117. Комаров С. В., Воскобойник В. Э., Зайцев А. Н., Новиков В. Ф. Разработка контроллера состояния заряда аккумуляторной батареи. *Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2006. № 10. С. 18–21.

118. Климов В., Зуенко В. Структура и алгоритмы функционирования системы управления источниками питания серии ДПК. *Силовая электроника*. 2008. Вып. 15, № 1. С. 63–66.
119. Коняев А. Выбор систем резервного электроснабжения. *Век качества*. 2009. № 5. С. 58–59.
120. Ушаков В. Бесперебойное питание и надежность связи. *Первая миля*. 2014. № 2. С. 102–106.
121. Эраносян С., Ланцов В. Источники бесперебойного питания: новый подход к синтезу. *Силовая электроника*. 2007. № 4. С. 49–54.
122. Эраносян С., Ланцов В. Источники бесперебойного питания: новый подход к синтезу. Часть 2. *Силовая электроника*. 2008. № 1. С. 48–55.
123. Эраносян С., Ланцов В. Источники бесперебойного питания: новый подход к синтезу. Часть 3. *Силовая электроника*. 2008. № 2. С. 60–66.
124. Pan S., Wang C., Jain P. Structure and Implementation of a Hybrid 48V / 380V DC UPS for IT Datacenters. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2018. P. 3851–3856.
125. Головастов А. Источники бесперебойного питания серии VH — универсальность не в ущерб надёжности. *Современные технологии автоматизации*. 2008. № 3. С. 14–20.
126. Patel H., Vaghela D. Design and Development of ON-LINE UPS using PIC Microcontroller. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2015. Vol. 2, No. 1. P. 429–434.
127. Ferraro M., Brunaccini G., Sergi F., Aloisio D., Randazzo N., Antonucci V. From Uninterruptible Power Supply to resilient smart micro grid: The case of a battery storage at telecommunication station. *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 28. P. 1–16.
128. Lin Q., Cai F., Wang W., Chen S., Zhang Z., You S. A High-Performance Online Uninterruptible Power Supply (UPS) System Based on Multitask Decomposition. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019. Vol. 55, No. 6. P. 7575–7585.

129. Zhao L. Design and implementation of a UPS system based on DSP. *Proceedings - 2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control, IS3C 2018*. 2018. P. 416–419.
130. Gopal C. S. S. K., Prabu A., Kumar G. S., Krishna P. G. UPS Parameter Monitoring and Controlling Using IOT and GSM. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2017. Vol. 116, No. 6. P. 133–139.
131. Mehmood M. U., Ali W., Ulasayar A., Zad H. S., Khattak A., Imran K. A Low Cost Internet of Things (LCIoT) Based System for Monitoring and Control of UPS System using Node-Red, CloudMQTT and IBM Bluemix. *1st International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering, ICECCE 2019*. 2019. P. 1–5.
132. Ясницкий Л. Н. Введение в искусственный интеллект. Москва:Издательский центр «Академия», 2005. 176 с.
133. Тимощук П. В. Штучні нейронні мережі: навчальний посібник. Львів:Видавництво Львівської політехніки, 2011. 444 с.
134. За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. Київ:Інститут електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
135. Змитрович А. И. Интеллектуальные информационные системы. Минск:НТООО «ТетраСистемс», 1997. 367 с.
136. Зайченко Ю. П. Основи проектування інтелектуальних систем. Київ:Видавничий дім «Слово», 2004. 352 с.
137. Корчемний М. О., Федорейко В. С. Інтелектуальні технології управління та прийняття рішень. Частина II. Нейронні та гібридні мережі. Тернопіль:ТНПУ, 2008. 197 с.
138. Стогній Б. С., Кириленко О. В., Денисюк С. П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 6. С. 44–50.
139. Алексеева И. Ю. Повышение надежности электроэнергетических систем на основе нейронных технологий. *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. Вып. 3, № 32. С. 15–19.

140. Голик О. П., Жесан Р. В., Березюк І. А. Підхід до розв'язання задачі автоматизації процесу керування електропостачанням автономних споживачів в умовах невизначеності. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2013. № 26. С. 218–224.
141. Косухіна О. С., Тонконог С. Є. Алгоритмічне забезпечення методу прогнозування обсягів споживання електроенергії з використанням рекурентної нейронної мережі. *Математичне моделювання*. 2017. Вип. 1, № 36. С. 11–16.
142. Mierlo S. Van, Vangheluwe H. Introduction to Statecharts Modeling, Simulation, Testing, and Deployment. *2019 Winter Simulation Conference (WSC)*. 2019. P. 1504–1518.
143. Caseiro L. M. A., Mendes A. M. S., Cruz S. M. A. Cooperative and Dynamically Weighted Model Predictive Control of a 3-Level Uninterruptible Power Supply With Improved Performance and Dynamic Response. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. Vol. 67, No. 6. P. 4934–4945.
144. Niroomand M., Karshenas H. R. Review and comparison of control methods for uninterruptible power supplies. *PEDSTC 2010 - 1st Power Electronics and Drive Systems and Technologies Conference*. 2010. P. 18–23.
145. Корчемний М., Федорейко В. Моделювання нелінійних процесів за допомогою нейронних мереж. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2009. Вип. 66, № 1. С. 100–109.

ДОДАТКИ

Додаток А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Palamar A., Pettai E., Beldjajev V. Control System for a Diesel Generator and UPS Based Microgrid. *Electrical, Control and Communication Engineering*. Riga, Latvia. 2010. Vol. 26, No. 1. P. 48–53. (Індексується в *Web of Science Core Collection*).

2. Palamar A., Karpinskyu M., Vodovozov V. Design and Implementation of a Digital Control and Monitoring System for an AC/DC UPS. *7th International Conference-Workshop «Compatibility and Power Electronics» (CPE 2011)*, Tallinn, Estonia. 2011. P. 173–177. (Індексується в *Scopus та Web of Science Core Collection*).

3. Palamar A. Control system simulation by modular uninterruptible power supply unit with adaptive regulation function. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, Ternopil, Ukraine. 2020. Vol. 98, No 2. P. 129–136. (Індексується в *Index Copernicus*).

4. Palamar A. Methods and means of increasing the reliability of computerized modular uninterruptible power supply system. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, Ternopil, Ukraine. 2020. Vol. 99, No 3. P. 133–141. (Індексується в *Index Copernicus*).

5. Паламар М., Пастернак Ю., Паламар А. Дослідження динамічних похибок системи прецизійного керування антеною з асинхронним електроприводом. *Вісник ТНТУ*. Тернопіль: ТНТУ. 2014. Вип. 76, № 4. С. 164–173. (Індексується в *Index Copernicus*).

6. Vasylykivskiy I., Ishchenko V., Pohrebennyk V., Palamar M., Palamar A. System of water objects pollution monitoring. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM 2017)*, Vienna, Austria. 2017. Vol. 17, No. 33. P. 355–362. (Індексується в *Scopus*).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Паламар М. І., Паламар А. М. Система керування і моніторингу пристроїв гарантованого електроживлення. *Праці II Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми й перспективи»*, Тернопіль. 2005. С. 135–139.

8. Palamar A., Pettai E. Microgrid for the Department of Electrical Drives and Power Electronics. *8th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering» and «Doctoral School of Energy and Geotechnology II»*, Pärnu, Estonia. 2010. P. 54–61.

9. Palamar A., Laugis J. Control System for Multiple Buildings Microgrid. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій»*, Тернопіль. 2010. С. 376–377.

10. Palamar A., Pettai E. Control Algorithm for a Diesel Generator Based Microgrid in Different Operation Modes. *9th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering» and «Doctoral School of Energy and Geotechnology II»*, Pärnu, Estonia. 2010. P. 89–94.

11. Palamar A., Karpinsky M. Control of an Uninterruptible Power Supply in a DC Microgrid System. *10th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering» and «Doctoral School of Energy and Geotechnology II»*, Pärnu, Estonia. 2011. P. 80–84.

12. Паламар А. М., Пастернак Ю. В. Модуль керування пристроєм гарантованого електроживлення постійного струму. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*: збірник тез доповідей, Тернопіль. 2013. С. 217.

13. Паламар А. М., Пастернак Ю. В., Паламар Я. М. Двох-процесорна інформаційно-вимірювальна система керування пристроєм безперебійного електроживлення. *Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*: збірник тез доповідей, Тернопіль. 2014. С. 211–212.

14. Паламар А. М., Осов'як І. І. Комп'ютерна інформаційно-вимірювальна система для моніторингу пристроїв безперебійного електроживлення. *Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми, перспективи»*, Тернопіль. 2015. С. 111–112.

15. Паламар А. М., Паламар М. О. Методи та засоби підвищення енергоефективності джерел безперебійного живлення для телекомунікаційних систем. *Матеріали XIX наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя*, Тернопіль. 2016. С. 169–170.

16. Паламар А. М. Комп'ютерна система для моніторингу параметрів джерел безперебійного живлення на основі технології Internet of Things. *Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій»*, Тернопіль. 2019. С. 208–209.

17. Паламар А. М. Програмно-апаратний комплекс для дистанційного моніторингу стану джерел безперебійного електроживлення. *Матеріали VII науково-технічної конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «Інформаційні моделі, системи та технології»*, Тернопіль. 2019. С. 132.

18. Паламар А. М. Моделювання алгоритму керування модульним джерелом безперебійного живлення з використанням діаграми станів. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 60 річчя з дня заснування ТНТУ та 175 річчя з дня народження Івана Пулюя*, Тернопіль. 2020. С. 172-173.

19. Паламар А. М. Функціональна схема інтелектуальної системи моніторингу джерел безперебійного живлення. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти*, Рівне. 2020. С 141-143.

20. Паламар А. М. Метод керування системою безперебійного живлення на основі прогнозування з використанням рекурентної нейронної мережі. *Матеріали ІХ міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь у світі сучасних технологій» за тематикою: «Використання інформаційних та комунікаційних технологій в сучасному цифровому суспільстві»*, Херсон. 2020. С 153-155.

21. Palamar A. Intelligent control and monitoring module for uninterruptible power supply system. *II International Scientific and Practical Conference «Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs» (MC&FPGA-2020)*, Kharkiv, Ukraine. 2020. P. 12-13.

22. Паламар А. М., Паламар М. О. Метод підвищення надійності компонентів модульної комп'ютеризованої системи безперебійного живлення. *Матеріали міжнародної наукової конференції «Іван Пулюй: життя в ім'я науки та України» (до 175-ліття від дня народження)*, Тернопіль. 2020. С. 91-92.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

23. Palamar M. I., Karpinskyu M. P., Palamar A. M. Neural network use in control system of antenna complex for information receive of earth remote sensing. *Електронне наукове фахове видання «Науковий вісник Донбасу»: Технічні науки. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://nvd.luguniv.edu.ua/archiv/NN6/08pmiers.pdf>*. 2008. Вип. 6, № 2.

24. Palamar M., Pasternak Y., Palamar A., Poikhalo A. Precision tracking of the trajectory LEO satellite by antenna with induction motors in the control system. *Proceedings of the 2017 IEEE 9th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2017)*, Bucharest, Romania. 2017. Vol. 2, P. 1051-1055. (*Індексується в Scopus та Web of Science Core Collection*).

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Директор
ТОВ «ТД «Інтеграл»
О.С. Колос
20 19 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Паламаря Андрія Михайловича

на тему «Методи і засоби покращення технічних характеристик інтелектуальних систем безперебійного живлення для телекомунікаційних комплексів»

Комісія у складі: голови – технічного директора Пальчика О.С., членів комісії – заступника технічного директора ТОВ «ТД «Інтеграл» Пішко Ростислава Григоровича, інженера відділу системотехніки Гніздюх Романа Васильовича склали цей акт про впровадження дисертаційної роботи старшого викладача кафедри комп'ютерних систем та мереж Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Результати дослідження методів і засобів покращення технічних характеристик інтелектуальних систем безперебійного живлення запропонованих Паламарем А. М. впроваджені на підприємстві в наступному об'ємі, а саме:

1. Розроблено інформаційне та програмне забезпечення процесу моніторингу стану та електричних параметрів джерела безперебійного живлення, що дозволяє покращити показники його надійності, зокрема коефіцієнт готовності та ймовірність безвідмовної роботи.

2. Розроблено апаратно-програмний компонент, який реалізує алгоритм роботи енергоефективного керування випрямлячами, що дозволило підвищити ККД джерела безперебійного електроживлення.

У результаті обговорення комісія дійшла висновку. Результати впровадження досліджень дисертаційної роботи Паламаря А. М. у вигляді компонентів комп'ютерної системи для керування та моніторингу джерел безперебійного живлення дали змогу підвищити показники надійності та енергоефективності роботи електроживильної установки ЕЖУ И 14000 Б 48-216.

Голова комісії:
технічний директор

О.С. Пальчик

Члени комісії:

заст. технічного директора

Р.Г. Пішко

інженер відділу системотехніки

Р.В. Гніздюх

**ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«ТЕРНОПІЛЬСЬКЕ КОНСТРУКТОРСЬКЕ БЮРО РАДІОЗВ'ЯЗКУ «СТРІЛА»**

46023, м. Тернопіль, вул 15 Квітня, 6, тел/факс – 28-75-00, 28-72-00, tkbr_strila@ukr.net,
р/р 26009308101054 в ТББВ 10019/08 Філія Тернопільського обласного управління Ощадбанку,
МФО 338545, код 14042350
№ 255 від 23.07.2020 р.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор ТОВ

Тернопільське КБ радіозв'язку «Стріла»

О.О. Рафалюк

2020 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

1. *Об'єкт впровадження:* Апаратно-програмні модулі комп'ютерної системи для керування джерелами безперебійного живлення.
2. *Ким запропоновано, виконавці, адреса:* Паламар Андрій Михайлович, старший викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, кафедра комп'ютерних систем та мереж, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.
3. *Джерело інформації:* Матеріали дисертаційної роботи Паламаря А.М. на тему: «Методи і засоби покращення технічних характеристик інтелектуальних систем безперебійного живлення для телекомунікаційних комплексів», спеціальність 05.13.15 – комп'ютерні системи та компоненти.
4. *Назва організації, що впроваджує:* ТОВ Тернопільське КБ радіозв'язку «Стріла», 46023, м. Тернопіль, вул. 15 Квітня, 6.
5. *Термін впровадження:* 2019-2020 рр.
6. *Висновок по впровадженню:* Запропоновані апаратно-програмні модулі стали основою для технічної реалізації та впровадження у виробництво компонентів інтелектуальної системи керування та моніторингу джерел безперебійного живлення, що дозволило покращити показники їх надійності та енергоефективності.

Даний акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Головний інженер
ТОВ ТКБР «Стріла»

С.О. Піскун

"ТЕХАС-Т" ПДЖУЮ"
Директор ТОВ «Техас-Т»

Ю.М. Марчук

" 10 " 2020 р.




АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

1. *Об'єкт впровадження:* Апаратно-програмні модулі комп'ютерної системи для керування джерелами безперебійного живлення.
2. *Ким запропоновано, виконавці, адреса:* Паламар Андрій Михайлович, старший викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, кафедра комп'ютерних систем та мереж, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.
3. *Джерело інформації:* Матеріали дисертаційної роботи Паламаря А.М. на тему: «Методи і засоби покращення технічних характеристик інтелектуальних систем безперебійного живлення для телекомунікаційних комплексів», спеціальність 05.13.15 – комп'ютерні системи та компоненти.
4. *Назва організації, що впроваджує:* Підприємство з розроблення та виробництва антенних систем ТОВ «ТЕХАС-Т», 46001, м. Тернопіль, вул. Б. Хмельницького, 16а, тел./факс: +38 0352 420214.
5. *Термін впровадження:* 2019-2020 рр.
6. *Висновок по впровадженню:* Запропоновані апаратно-програмні модулі стали основою для технічної реалізації та впровадження у виробництво компонентів систем керування та моніторингу джерел безперебійного живлення для систем критичного застосування, зокрема телекомунікаційних систем космічного зв'язку, що дало б змогу покращити показники їх надійності та енергоефективності.
7. Економічний ефект не підраховувався.

Даний акт не є підставою для фінансових розрахунків

Технічний керівник
ТОВ «Техас-Т»

 В. Свередок



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

1. *Об'єкт впровадження:* Програмно-апаратні методи та засоби підвищення ефективності системи безперебійного живлення для телекомунікаційних комплексів.
2. *Ким запропоновано, виконавці, адреса:* Паламар Андрій Михайлович, старший викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, кафедра комп'ютерних систем та мереж, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.
3. *Джерело інформації:* Дисертаційна роботи Паламаря А.М. на тему «Методи і засоби покращення технічних характеристик інтелектуальних систем безперебійного живлення для телекомунікаційних комплексів».
4. *Назва організації, що впроваджує:* Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, кафедра комп'ютерних систем та мереж, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.
5. *Термін впровадження:* 2019-2020 рр.
6. *Висновок по впровадженню:* Запропоновані програмно-апаратні методи та засоби дозволяють створювати високонадійні компоненти комп'ютерних систем керування та моніторингу джерел безперебійного живлення з одночасним підвищенням їх енергоефективності та покращенням технічних характеристик. Запропоновані схемотехнічні рішення та програмно-алгоритмічні модулі використовуються в навчальному процесі кафедри комп'ютерних систем та мереж при вивченні дисциплін: «Основи інтернету речей», «Комп'ютерна схемотехніка», «Системне програмування».

Старший викладач кафедри
 комп'ютерних систем та мереж

А.М. Паламар

Зав. кафедри комп'ютерних
 систем та мереж, к.т.н. доцент

Г.М. Осухівська

Фрагменти програмного коду для керування та моніторингу джерел безперебійного живлення

Лістинг В.1 – Програмна реалізація процесу аналого-цифрового перетворення під час вимірювання електричних параметрів ДБЖ. Модуль adc.c

```

#include <RTL.h>
#include "adc.h"
#include "common.h"
#include "mmap.h"
#include <string.h>
#include "crc32.h"
#include "dac.h"
#include "TaskPriorities.h"
#include "params.h"
static TADCPParams gADCPParams;
TADCChannel ADCChnl[ADC_CHANNEL_COUNT];
uint16_t ADC_buf[ADC_CHANNEL_COUNT];
uint32_t ADCData[ADC_CHNL_NUM];

void Init_ADC (void) {
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
    ADC_InitTypeDef ADC_InitStructure;
    /* Enable ADC1 and GPIOA clock */
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_ADC1 | RCC_APB2Periph_GPIOC,
ENABLE);
    /* Configure PA.01 (ADC Channel1) as analog input */
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_0|GPIO_Pin_1;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AIN;
    GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStructure);
    ADC_DeInit(ADC1);
    RCC_ADCCLKConfig(RCC_PCLK2_Div6);
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_ADC1, ENABLE);
    ADC_DeInit(ADC1);
    ADC_InitStructure.ADC_Mode = ADC_Mode_Independent;
    ADC_InitStructure.ADC_ScanConvMode = DISABLE;
    ADC_InitStructure.ADC_ContinuousConvMode = DISABLE;
    ADC_InitStructure.ADC_ExternalTrigConv = ADC_ExternalTrigConv_None;
    ADC_InitStructure.ADC_DataAlign = ADC_DataAlign_Right;
    ADC_InitStructure.ADC_NbrOfChannel = 1;
    /* Now do the setup */

```

```

ADC_Init(ADC1, &ADC_InitStructure);
/* Enable ADC1 */
ADC_Cmd(ADC1, ENABLE);
ADC_ResetCalibration(ADC1);
while(ADC_GetResetCalibrationStatus(ADC1));
ADC_StartCalibration(ADC1);
while(ADC_GetCalibrationStatus(ADC1));
}

uint16_t readADC (uint8_t channel) {
    ADC_RegularChannelConfig(ADC1, channel, 1, ADC_SampleTime_1Cycles5);
    // Start the conversion
    ADC_SoftwareStartConvCmd(ADC1, ENABLE);
    // Wait until conversion completion
    while(ADC_GetFlagStatus(ADC1, ADC_FLAG_EOC) == RESET);
    // Get the conversion value
    return ADC_GetConversionValue(ADC1);
}

void ADC_MF_AddValue(uint8_t ChnlNum, uint16_t ADCVal) {
    ADCChnl[ChnlNum].Buf[ADCChnl[ChnlNum].Index++] = ADCVal;
    if (ADCChnl[ChnlNum].Index >= MEDIAN_WINDOW_SIZE) ADCChnl[ChnlNum].Index
= 0;
}

uint16_t ADC_MF_Proces(uint8_t ChnlNum) {
    uint16_t Buf[MEDIAN_WINDOW_SIZE];
    uint16_t value;
    int i, j;
    // Copy buffer
    for (i = 0; i<MEDIAN_WINDOW_SIZE; i++)
        Buf[i] = ADCChnl[ChnlNum].Buf[i];

    // Sort buffer (Metod: Insertion sort)
    for (i = 1; i<MEDIAN_WINDOW_SIZE; i++) {
        value = Buf[i];
        for (j = i - 1; j >= 0 && Buf[j] > value; j--) {
            Buf[j + 1] = Buf[j];
        }
        Buf[j + 1] = value;
    }
    return Buf[MEDIAN_WINDOW_SIZE/2];
}

uint16_t nStepFilterUn(uint16_t val) {

```

```

#define shift (7) // n = 2^shift
#define lsb ((1 << (shift)) >> 1)
    static int x = 0;
    int av = (x + lsb) >> shift;
    x += val - av;
    return av;
#undef lsb
#undef shift
}

uint16_t nStepFilterIn(uint16_t val) {
#define shift (7) // n = 2^shift
#define lsb ((1 << (shift)) >> 1)
    static int x = 0;
    int av = (x + lsb) >> shift;
    x += val - av;
    return av;
#undef lsb
#undef shift
}

uint16_t nStepFilter1(uint16_t val) {
#define shift (7) // n = 2^shift
#define lsb ((1 << (shift)) >> 1)
    static int x = 0;
    int av = (x + lsb) >> shift;
    x += val - av;
    return av;
#undef lsb
#undef shift
}

uint16_t nStepFilter2(uint16_t val) {
#define shift (7) // n = 2^shift
#define lsb ((1 << (shift)) >> 1)
    static int x = 0;
    int av = (x + lsb) >> shift;
    x += val - av;
    return av;
#undef lsb
#undef shift
}

uint16_t nStepFilter3(uint16_t val) {
#define shift (7) // n = 2^shift

```



```

#define lsb ((1 << (shift)) >> 1)
    static int x = 0;
    int av = (x + lsb) >> shift;
    x += val - av;
    return av;
#undef lsb
#undef shift
}

uint16_t nStepFilterI4(uint16_t val) {
#define shift (7) // n = 2^shift
#define lsb ((1 << (shift)) >> 1)
    static int x = 0;
    int av = (x + lsb) >> shift;
    x += val - av;
    return av;
#undef lsb
#undef shift
}

uint16_t nStepFilterUA(uint16_t val) {
#define shift (6) // n = 2^shift
#define lsb ((1 << (shift)) >> 1)
    static int x = 0;
    int av = (x + lsb) >> shift;
    x += val - av;
    return av;
#undef lsb
#undef shift
}

uint16_t nStepFilterUB(uint16_t val) {
#define shift (6) // n = 2^shift
#define lsb ((1 << (shift)) >> 1)
    static int x = 0;
    int av = (x + lsb) >> shift;
    x += val - av;
    return av;
#undef lsb
#undef shift
}

uint16_t nStepFilterUC(uint16_t val) {
#define shift (6) // n = 2^shift
#define lsb ((1 << (shift)) >> 1)

```

```

    static int x = 0;
    int av = (x + lsb) >> shift;
    x += val - av;
    return av;
#undef lsb
#undef shift
}

void GetADCCannel(void) {
    ADC_MF_AddValue(Un, readADC(Un));
    ADC_MF_AddValue(In, readADC(In));
    ADC_MF_AddValue(I1, readADC(I1));
    ADC_MF_AddValue(I2, readADC(I2));
    ADC_MF_AddValue(I3, readADC(I3));
    ADC_MF_AddValue(I4, readADC(I4));
    ADC_MF_AddValue(UA, readADC(UA));
    ADC_MF_AddValue(UB, readADC(UB));
    ADC_MF_AddValue(UC, readADC(UC));

    ADCData[Un] = ADC_MF_Proces(Un);
    ADCData[In] = ADC_MF_Proces(In);
    ADCData[I1] = ADC_MF_Proces(I1);
    ADCData[I2] = ADC_MF_Proces(I2);
    ADCData[I3] = ADC_MF_Proces(I3);
    ADCData[I4] = ADC_MF_Proces(I4);
    ADCData[UA] = ADC_MF_Proces(UA);
    ADCData[UB] = ADC_MF_Proces(UB);
    ADCData[UC] = ADC_MF_Proces(UC);

    gDevState.ADCValue[Un] = Calculate_ADC(((float)ADCData[Un], UN_OFFSET,
gADCPParams.Channel[Un].Offset, UN_GAIN, gADCPParams.Channel[Un].Gain);
    gDevState.ADCValue[In] = Calculate_ADC(((float)ADCData[In], IN_OFFSET,
gADCPParams.Channel[In].Offset, IN_GAIN, gADCPParams.Channel[In].Gain);
    gDevState.ADCValue[I1] = Calculate_ADC(((float)ADCData[I1]+(float)I1_OFFSET), 0,
gADCPParams.Channel[I1].Offset, I1_GAIN, gADCPParams.Channel[I1].Gain);
    gDevState.ADCValue[I2] = Calculate_ADC(((float)ADCData[I2]+(float)I2_OFFSET), 0,
gADCPParams.Channel[I2].Offset, I2_GAIN, gADCPParams.Channel[I2].Gain);
    gDevState.ADCValue[I3] = Calculate_ADC(((float)ADCData[I3]+(float)I3_OFFSET), 0,
gADCPParams.Channel[I3].Offset, I3_GAIN, gADCPParams.Channel[I3].Gain);
    gDevState.ADCValue[I4] = Calculate_ADC(((float)ADCData[I4]+(float)I4_OFFSET), 0,
gADCPParams.Channel[I4].Offset, I4_GAIN, gADCPParams.Channel[I4].Gain);
    gDevState.ADCValue[UA] = Calculate_ADC(((float)ADCData[UA], UA_OFFSET,
gADCPParams.Channel[UA].Offset, UA_GAIN, gADCPParams.Channel[UA].Gain);
    gDevState.ADCValue[UB] = Calculate_ADC(((float)ADCData[UB], UB_OFFSET,
gADCPParams.Channel[UB].Offset, UB_GAIN, gADCPParams.Channel[UB].Gain);

```

```

    gDevState.ADCValue[UC] = Calculate_ADC((float)ADCData[UC], UC_OFFSET,
gADCPParams.Channel[UC].Offset, UC_GAIN, gADCPParams.Channel[UC].Gain);
    gControlState.Imax = GetMaxI(gDevState.ADCValue[I1], gDevState.ADCValue[I2],
gDevState.ADCValue[I3], gDevState.ADCValue[I4]);
    gControlState.Imin = GetMinI(gDevState.ADCValue[I1], gDevState.ADCValue[I2],
gDevState.ADCValue[I3], gDevState.ADCValue[I4]);
}

float GetMaxI(float Im1, float Im2, float Im3, float Im4) {
    float Imax = 0;
    if (Im1 > Imax) Imax = Im1;
    if (Im2 > Imax) Imax = Im2;
    if (Im3 > Imax) Imax = Im3;
    if (Im4 > Imax) Imax = Im4;
    return Imax;
}

float GetMinI(float Im1, float Im2, float Im3, float Im4) {
    float Imin = 0;
    if (Im1 < Imin) Imin = Im1;
    if (Im2 < Imin) Imin = Im2;
    if (Im3 < Imin) Imin = Im3;
    if (Im4 < Imin) Imin = Im4;
    return Imin;
}

float Calculate_ADC(float ADC, float koef_offset_main, float koef_offset_change,
float koef_gain_main, float koef_gain_change) {
    float Result;
    Result = ((ADC*koef_gain_main*(koef_gain_change) + koef_offset_main +
(koef_offset_change)));
    return Result;
}

void GetADCRawData(PADCRawData pADCRawData) {
    int i;
    for (i=0; i<ADC_CHANNEL_COUNT; i++) {
        pADCRawData->Channel[i] = ADCData[i];
    }
    pADCRawData->CRC32 = crc32(pADCRawData, sizeof(*pADCRawData)-
sizeof(pADCRawData->CRC32), CRC32_INIT);
}

BOOL GetADCParameters(PADCPParams pADCPPrm) {
    memcpy (pADCPPrm, &gADCPParams, sizeof(gADCPParams));
}

```

```

return __TRUE;
}

BOOL SetADCParameters(PADCParams pADCPrm) {
    memcpy (&gADCParams, pADCPrm, sizeof(gADCParams));
    return __TRUE;
}

BOOL StoreADCParameters(PADCParams pADCPrm) {
    U32 *pRdAddr;
    U32 *pWrAddr;
    U32 Dat32;
    memcpy (&gADCParams, pADCPrm, sizeof(gADCParams));
    gADCParams.CRC32 = crc32(&gADCParams, sizeof(gADCParams)-
sizeof(gADCParams.CRC32), CRC32_INIT);
    FLASH_Unlock();
    FLASH_ErasePage(ADC_PARAMS_BASEADDR);
    pWrAddr = (U32 *)ADC_PARAMS_BASEADDR;
    pRdAddr = (U32 *)&gADCParams;
    for (;(U32)pWrAddr<ADC_PARAMS_BASEADDR+sizeof(*pADCPrm); ) {
        Dat32 = *pRdAddr;
        FLASH_ProgramWord((uint32_t)pWrAddr, Dat32 );
        pWrAddr++;
        pRdAddr++;
    }
    FLASH_Lock();
    return __TRUE;
}

void SetDefaultADCParams(void) {
    gADCParams.Channel[Un].Enabled = __TRUE;
    gADCParams.Channel[Un].Offset = ADC_U_OFFSET;
    gADCParams.Channel[Un].Gain = ADC_U_GAIN;
    gADCParams.Channel[In].Enabled = __TRUE;
    gADCParams.Channel[In].Offset = ADC_I_OFFSET;
    gADCParams.Channel[In].Gain = ADC_I_GAIN;
    gADCParams.Channel[I1].Enabled = __TRUE;
    gADCParams.Channel[I1].Offset = ADC_I_OFFSET;
    gADCParams.Channel[I1].Gain = ADC_I_GAIN;
    gADCParams.Channel[I2].Enabled = __TRUE;
    gADCParams.Channel[I2].Offset = ADC_I_OFFSET;
    gADCParams.Channel[I2].Gain = ADC_I_GAIN;
    gADCParams.Channel[I3].Enabled = __TRUE;
    gADCParams.Channel[I3].Offset = ADC_I_OFFSET;
    gADCParams.Channel[I3].Gain = ADC_I_GAIN;
}

```

```

gADCPParams.Channel[I4].Enabled      = __TRUE;
gADCPParams.Channel[I4].Offset       = ADC_I_OFFSET;
gADCPParams.Channel[I4].Gain         = ADC_I_GAIN;
gADCPParams.Channel[UA].Enabled      = __TRUE;
gADCPParams.Channel[UA].Offset       = ADC_U_OFFSET;
gADCPParams.Channel[UA].Gain         = ADC_U_GAIN;
gADCPParams.Channel[UB].Enabled      = __TRUE;
gADCPParams.Channel[UB].Offset       = ADC_U_OFFSET;
gADCPParams.Channel[UB].Gain         = ADC_U_GAIN;
gADCPParams.Channel[UC].Enabled      = __TRUE;
gADCPParams.Channel[UC].Offset       = ADC_U_OFFSET;
gADCPParams.Channel[UC].Gain         = ADC_U_GAIN;
}
void LoadADCParameters(void) {
    memset (&gADCPParams, '\0', sizeof(gADCPParams));
    if (((PADCPParams)(ADC_PARAMS_BASEADDR))->CRC32 == crc32((const unsigned
char *) (ADC_PARAMS_BASEADDR), sizeof(gADCPParams)-sizeof(gADCPParams.CRC32),
CRC32_INIT)) {
        memcpy      (&gADCPParams,      (PADCPParams)ADC_PARAMS_BASEADDR      ,
sizeof(gADCPParams));
    }
    SetDefaultADCParams();
    gADCPParams.CRC32      =      crc32(&gADCPParams,      sizeof(gADCPParams)-
sizeof(gADCPParams.CRC32), CRC32_INIT);
    StoreADCParameters(&gADCPParams);
}
}
/*----- Task 'adc': Measure channels of ADC -----*/
__task void adc (void) {
    os_itv_set (1);
    while(1) {
        GetADCCannel();
        if (gControlState.lmax > (gParam_ab.ABParams.lcharge*2)) {
            gControlState.Ucontrol = U_CONTROL_MAX;
            Set_DAC(gControlState.Ucontrol);
        }
        os_itv_wait();
    }
}

void Analog_Init(void) {
    LoadADCParameters();
    os_tsk_create (adc, ADC_TASK_PRIORITY); /* Start transmit task */
}
/*----- end of file -----*/

```

Лістинг В.2 – Програмна реалізація методу адаптивного регулювання рівня завантаженості випрямляючих модулів джерела безперебійного живлення. Модуль rectifier.c.

```

#include "rectifier.h"
#include "PwrManager.h"
#include "io.h"
uint8_t flour = 0;
uint8_t module = 0;
uint8_t pos1 = 0, pos21 = 1, pos31 = 0, pos41 = 0, pos51 = 0, pos61 = 0;
uint32_t period;

void InitBeforeManagerStart(void) {
    ConnectAllModules();
}

void ConnectAllModules(void) {
    CommutationModules(LEVEL1, 0);
    CommutationModules(LEVEL2, 0);
}

void CommutationModules(int flour, uint8_t module)
{
    CANMsgSend.id = flour;
    CANMsgSend.data[0] = module;
    for (int i=0; i<=7; i++) CANMsgSend.data[i] = 0x00;
    CANMsgSend.len = 8;
    CANMsgSend.ch = 1;
    CANMsgSend.format = STANDARD_FORMAT;
    CANMsgSend.type = DATA_FRAME;
    CAN_send (1, &CANMsgSend, 0x0F00);
    os_dly_wait (50);
}

void CommutationModulesFast(int flour, uint8_t module) {
    CANMsgSend.id = flour;
    CANMsgSend.data[0] = module;
    for (int i=1; i<=7; i++) CANMsgSend.data[i] = 0x00;
    CANMsgSend.len = 8;
    CANMsgSend.ch = 1;
    CANMsgSend.format = STANDARD_FORMAT;
    CANMsgSend.type = DATA_FRAME;
    CAN_send (1, &CANMsgSend, 0x0F00);
}

```

```

os_dly_wait (3);
}

void Manager(void) {
    uint8_t i = 0, x = 0;
    uint8_t kil_enabled = 0, kil_presence = 0;
    for (i = 0; i < MODULE_COUNT_MAX; i++) {
        if (gPwrMod[i].Ready == 1) kil_enabled++;
    }
    gManagerState.Kil_kaset = kil_enabled;
    for (x = 0; x < MODULE_COUNT_MAX; x++) {
        if (gPwrMod[x].Presense == 1) kil_presence++;
    }
    gManagerState.Kil_kaset_all = kil_presence;
    if (gManagerState.Kil_kaset_all != gManagerState.Kil_kaset_all_old) StopManager();
    gManagerState.Koef = GetKoef();
    gDevState.Koef = gManagerState.Koef;
    if (gParam_manager.MgrParams.OnOff == MANAGER_ON) {
        GetAlarm2FromManager();
        ReadAlarm_3();
        if (((gControlState.Alarms.A1 || gControlState.Alarms.A2 ||
            gControlState.Alarms.A3 || gControlState.Alarms.A4 ||
            gControlState.Alarms.A9) == ALARM_ON) ||
            (gDevState.ADCValue[UA] < U_FAZA_MIN) ||
            (gDevState.ADCValue[UB] < U_FAZA_MIN) ||
            (gDevState.ADCValue[UC] < U_FAZA_MIN)) {
            pos1 = 0;
            gManagerState.Period = 0;
            gManagerState.Time = gDevState.TimeCounter;
            ConnectAllModules();
            gManagerState.ModuleNumber = gManagerState.Kil_kaset_all;
            ReadAlarm_2();
            ReadAlarm_3();
        } else {
            if (gDevState.Testing == TESTING_ON) {
                pos1 = 0;
                gManagerState.Period = 0;
                gManagerState.Time = gDevState.TimeCounter;
                ConnectAllModules();
                gManagerState.ModuleNumber = gManagerState.Kil_kaset_all;
                ReadAlarm_2();
                ReadAlarm_3();
            } else
            if (gDevState.Testing == TESTING_OFF) {
                gManagerState.Period = gDevState.TimeCounter - gManagerState.Time;
            }
        }
    }
}

```

```

if (pos1 == 0) period = gParam_manager.MgrParams.Period;
else {
    if ((pos1 % 2) == 0) period = gParam_manager.MgrParams.Period;
    else if ((pos1 % 2) == 1) period = COMMUTATION_DELAY;
}

//***** Koef > Max *****
if (gManagerState.Koef > gParam_manager.MgrParams.Koef_max) {
    uint8_t number = 0;
    number = gManagerState.ModuleNumber;
    gManagerState.Period = 0;
    gManagerState.Time = gDevState.TimeCounter;
    gManagerState.Koef_next = CalculateNextKoef(number);
    while ((gManagerState.Koef_next >= (gParam_manager.MgrParams.Koef_max
+ gParam_manager.MgrParams.Koef_max_hyst)) && (number <=
gManagerState.Kil_kaset_all)) {
        number++;
        gManagerState.Koef_next = CalculateNextKoef(number);
    }
    gManagerState.ModuleNumber = number;
    if (pos1 > 1) pos1--;
    ModuleCommutation();
} else {
    if (gManagerState.Period > period) {
        gManagerState.Period = 0;
        gManagerState.Time = gDevState.TimeCounter;
//***** Koef < Min *****
        if (gManagerState.Koef < gParam_manager.MgrParams.Koef_min) {
            uint8_t number = 0;
            number = gManagerState.ModuleNumber;
            gManagerState.Koef_next = CalculateNextKoef(number);
            while ((gManagerState.Koef_next <=
(gParam_manager.MgrParams.Koef_min + gParam_manager.MgrParams.Koef_min_hyst))
&& (number >= 1)) {
                number--;
                gManagerState.Koef_next = CalculateNextKoef(number);
            }
            if (CalculateNextKoef(number) >= gParam_manager.MgrParams.Koef_max)
number++;
            gManagerState.ModuleNumber = number;
        }
        ModuleCommutation();
    }
}
}
}
}

```



```

    }
} else {
    if (gParam_manager.MgrParams.OnOff == MANAGER_OFF) {
        StopManager();
        ReadAlarm_2();
        ReadAlarm_3();
    }
}
gManagerState.Kil_kaset_all_old = gManagerState.Kil_kaset_all;
}

void StopManager(void) {
    pos1 = 0;
    gManagerState.ModuleNumber = gManagerState.Kil_kaset_all;
    gManagerState.Period = 0;
    gManagerState.Time = gDevState.TimeCounter;
    ConnectAllModules();
}

float GetKoeff(void) {
    float Koef = 0;
    float Pn, Pm;
    Pn = (gDevState.ADCValue[In] + gDevState.ADCValue[I1] + gDevState.ADCValue[I2] +
gDevState.ADCValue[I3] + gDevState.ADCValue[I4])*gDevState.ADCValue[Un];
    Pm = (float)gManagerState.Kil_kaset*gParam_manager.MgrParams.P_kaset*1000;
    if (Pm != 0) Koef = Pn/Pm;
    return Koef;
}

float CalculateNextKoeff(int next_kil) {
    float NextKoef = 0;
    float Pn, Pm;
    Pn = (gDevState.ADCValue[In] + gDevState.ADCValue[I1] + gDevState.ADCValue[I2] +
gDevState.ADCValue[I3] + gDevState.ADCValue[I4])*gDevState.ADCValue[Un];
    Pm = (next_kil)*gParam_manager.MgrParams.P_kaset*1000;
    if (Pm != 0) NextKoef = Pn/Pm;
    return NextKoef;
}

void Connect2of6Mudules(void) {
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[9].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 7);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 4);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[10].Presense == 1)) {

```

```

    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 7);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 2);
}
if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[0].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 6);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 6);
}
if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[1].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 5);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 6);
}
if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 3);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 6);
}
if ((gPwrMod[9].Presense == 1) && (gPwrMod[10].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 7);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 1);
}
if ((gPwrMod[9].Presense == 1) && (gPwrMod[0].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 6);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 5);
}
if ((gPwrMod[9].Presense == 1) && (gPwrMod[1].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 5);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 5);
}
if ((gPwrMod[9].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 3);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 5);
}
if ((gPwrMod[10].Presense == 1) && (gPwrMod[0].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 6);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 3);
}
if ((gPwrMod[10].Presense == 1) && (gPwrMod[1].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 5);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 3);
}
if ((gPwrMod[10].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 3);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 3);
}
if ((gPwrMod[0].Presense == 1) && (gPwrMod[1].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 4);
}

```

```

    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 7);
}
if ((gPwrMod[0].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 2);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 7);
}
if ((gPwrMod[1].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 1);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 7);
}
}

void Connect3of6Mudules(void) {
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[9].Presense == 1) &&
(gPwrMod[10].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 7);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 0);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[9].Presense == 1) &&
(gPwrMod[0].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 6);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 4);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[9].Presense == 1) &&
(gPwrMod[1].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 5);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 4);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[9].Presense == 1) &&
(gPwrMod[2].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 3);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 4);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[10].Presense == 1) &&
(gPwrMod[0].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 6);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 2);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[10].Presense == 1) &&
(gPwrMod[1].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 5);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 2);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[10].Presense == 1) &&
(gPwrMod[2].Presense == 1)) {

```

```

    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 3);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 2);
}
if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[0].Presense == 1) &&
(gPwrMod[1].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 4);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 6);
}
if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[0].Presense == 1) &&
(gPwrMod[2].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 2);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 6);
}
if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[1].Presense == 1) &&
(gPwrMod[2].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 1);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 6);
}
if ((gPwrMod[9].Presense == 1) && (gPwrMod[10].Presense == 1) &&
(gPwrMod[0].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 6);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 1);
}
if ((gPwrMod[9].Presense == 1) && (gPwrMod[10].Presense == 1) &&
(gPwrMod[1].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 5);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 1);
}
if ((gPwrMod[9].Presense == 1) && (gPwrMod[10].Presense == 1) &&
(gPwrMod[2].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 3);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 1);
}
if ((gPwrMod[9].Presense == 1) && (gPwrMod[0].Presense == 1) &&
(gPwrMod[1].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 4);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 5);
}
if ((gPwrMod[9].Presense == 1) && (gPwrMod[0].Presense == 1) &&
(gPwrMod[2].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 2);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 5);
}
if ((gPwrMod[9].Presense == 1) && (gPwrMod[1].Presense == 1) &&
(gPwrMod[2].Presense == 1)) {

```

```

    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 1);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 5);
}
if ((gPwrMod[10].Presense == 1) && (gPwrMod[0].Presense == 1) &&
(gPwrMod[1].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 4);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 3);
}
if ((gPwrMod[10].Presense == 1) && (gPwrMod[0].Presense == 1) &&
(gPwrMod[2].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 2);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 3);
}
if ((gPwrMod[0].Presense == 1) && (gPwrMod[1].Presense == 1) &&
(gPwrMod[2].Presense == 1)) {
    CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 0);
    CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 7);
}
}

void Connect4of6Mudules(void) {
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[9].Presense == 1) &&
(gPwrMod[10].Presense == 1) && (gPwrMod[0].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 6);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 0);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[9].Presense == 1) &&
(gPwrMod[10].Presense == 1) && (gPwrMod[1].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 5);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 0);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[9].Presense == 1) &&
(gPwrMod[10].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 3);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 0);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[9].Presense == 1) &&
(gPwrMod[0].Presense == 1) && (gPwrMod[1].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 4);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 4);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[9].Presense == 1) &&
(gPwrMod[0].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 2);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 4);
    }
}

```

```

    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[9].Presense == 1) &&
(gPwrMod[1].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 1);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 4);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[10].Presense == 1) &&
(gPwrMod[0].Presense == 1) && (gPwrMod[1].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 4);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 2);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[10].Presense == 1) &&
(gPwrMod[0].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 2);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 2);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[10].Presense == 1) &&
(gPwrMod[1].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 1);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 2);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[0].Presense == 1) &&
(gPwrMod[1].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 0);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 6);
    }
    if ((gPwrMod[9].Presense == 1) && (gPwrMod[10].Presense == 1) &&
(gPwrMod[0].Presense == 1) && (gPwrMod[1].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 4);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 1);
    }
    if ((gPwrMod[9].Presense == 1) && (gPwrMod[10].Presense == 1) &&
(gPwrMod[0].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 2);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 1);
    }
    if ((gPwrMod[9].Presense == 1) && (gPwrMod[10].Presense == 1) &&
(gPwrMod[1].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 1);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 1);
    }
    if ((gPwrMod[9].Presense == 1) && (gPwrMod[0].Presense == 1) &&
(gPwrMod[1].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 0);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 5);
    }

```

```

    }
    if ((gPwrMod[10].Presense == 1) && (gPwrMod[0].Presense == 1) &&
(gPwrMod[1].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense == 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 0);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 3);
    }
}

void Connect5of6Mudules(void) {
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[9].Presense == 1) &&
(gPwrMod[10].Presense == 1) && (gPwrMod[0].Presense == 1) && (gPwrMod[1].Presense
== 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 4);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 0);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[9].Presense == 1) &&
(gPwrMod[10].Presense == 1) && (gPwrMod[0].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense
== 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 2);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 0);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[9].Presense == 1) &&
(gPwrMod[10].Presense == 1) && (gPwrMod[1].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense
== 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 1);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 0);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[9].Presense == 1) &&
(gPwrMod[0].Presense == 1) && (gPwrMod[1].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense
== 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 0);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 4);
    }
    if ((gPwrMod[8].Presense == 1) && (gPwrMod[10].Presense == 1) &&
(gPwrMod[0].Presense == 1) && (gPwrMod[1].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense
== 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 0);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 2);
    }
    if ((gPwrMod[9].Presense == 1) && (gPwrMod[10].Presense == 1) &&
(gPwrMod[0].Presense == 1) && (gPwrMod[1].Presense == 1) && (gPwrMod[2].Presense
== 1)) {
        CommutationModules(gManagerState.Adr[1], 0);
        CommutationModules(gManagerState.Adr[2], 1);
    }
}

```

```

}

void GetAlarm2FromManager(void) {
    if (((gPwrMod[0].Enabled == 1) && (gPwrMod[0].Ready == 0)) ||
        ((gPwrMod[1].Enabled == 1) && (gPwrMod[1].Ready == 0)) ||
        ((gPwrMod[2].Enabled == 1) && (gPwrMod[2].Ready == 0)) ||
        ((gPwrMod[8].Enabled == 1) && (gPwrMod[8].Ready == 0)) ||
        ((gPwrMod[9].Enabled == 1) && (gPwrMod[9].Ready == 0)) ||
        ((gPwrMod[10].Enabled == 1) && (gPwrMod[10].Ready == 0))) {
        if ((gDevState.TimeCounter - gManagerState.Time2Alarm) >= DELAY_2_ALARM) {
            if (period != COMMUTATION_DELAY) {
                SetFaults(2,0);
                NORM_OUT_OFF();
            }
        }
    } else {
        SetFaults(2,1);
        NORM_OUT_ON();
        gManagerState.Time2Alarm = gDevState.TimeCounter;
    }
}

void GetAlarm3FromManager(void) {
    if ((gPwrMod[0].Faults != 1) || (gPwrMod[1].Faults != 1) ||
        (gPwrMod[2].Faults != 1) || (gPwrMod[8].Faults != 1) ||
        (gPwrMod[9].Faults != 1) || (gPwrMod[10].Faults != 1)) {
        if (period != COMMUTATION_DELAY) {
            SetFaults(3,0);
            ZAH_OUT_OFF();
        }
    } else {
        if ((gDevState.TimeCounter - gManagerState.Time3Alarm) >= DELAY_3_ALARM) {
            SetFaults(3,1);
            ZAH_OUT_ON();
            gManagerState.Time3Alarm = gDevState.TimeCounter;
        }
    }
}

/*----- end of file -----*/

```