

## АНОТАЦІЯ

*Мельник Р.В.* Інформаційна технологія управління енергодинамічними режимами за наявності поновлювальних джерел енергії. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» (12 – Інформаційні технології). – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2021.

### **Зміст анотації**

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання: підвищення ефективності управління енергодинамічними режимами гібридної системи електропостачання за наявності акумулюючої системи шляхом розроблення нових і вдосконалення сучасних методів та моделей для інформаційної технології підтримки прийняття рішень.

У першому розділі проаналізовано інформаційні технології управління енергодинамічними режимами гібридної вітро-сонячної системами електропостачання за наявності акумулюючої системи. Визначено основні проблеми, які виникають в процесі управління, на основі яких сформовано перелік основних завдання дослідження.

Встановлено, що потужність вітрових, сонячних або гібридних системи електропостачання може бути обмежена диспетчером мережі з метою збереження енергетичного балансу, а також, для підтримки стабільності енергодинамічних режимів роботи мереж загального користування. В умовах виробництва електроенергії відповідно до обмежень диспетчера мережі (графіка навантаження) і в умовах зміни параметрів зовнішнього середовища (швидкість вітру, інтенсивність сонячної радіації тощо) актуальною є завдання визначення активного складу, тобто набору вітрових електроустановок, які б найкращим чином забезпечили потреби користувачів з врахуванням ефективності кожної вітрової електроустановки.

Проведено аналіз наявних підходів до формалізації і методів визначення активного складу вітрової електричної станції. Встановлено, що зараз модифікований метод динамічного програмування показує одні з найкращих результатів по точності знаходження розв'язку і швидкодії. Обґрунтовано, що застосування штучних нейронних мереж і генетичні алгоритми, для розв'язання завдання знаходження активного складу є перспективним напрямком дослідження.

Встановлено, що для ефективної роботи блока управління гібридної системи електропостачання необхідно розробити модель акумулюючої системи з врахуванням особливостей фізико-хімічних процесів і режиму заряду. Така модель дозволяє прогнозувати кількість енергії, яка може бути заряджена/розряджена протягом заданого періоду часу, що необхідно для того щоб моделювати роботу гібридної системи електропостачання і надавати рекомендації диспетчеру.

На основі проведеного аналізу сформовано мету і завдання дослідження.

В другому розділі досліджено процес управління енергодинамічними режимами гібридної системи енергопостачання за наявності акумулюючої системи. На основі аналізу сучасних підходів до управління гібридними системами розроблено набір продукційних правил, що дозволяє обґрунтувати моменти реалізації керуючих впливів з метою зміни режимів роботи елементів системи енергопостачання.

Розроблено модель процесу заряду-розряду акумулюючої системи, що використовується для моделювання роботи гібридної системи електропостачання і формування рекомендацій для диспетчера. На відміну від існуючих моделей, для функціонування яких необхідна велика кількість нелінійних залежностей і різноманітних електрофізичних параметрів, розроблена модель дозволяє досягнути задовільну точність за меншої кількості обчислювальних. Для перевірки коректності розробленої моделі використано модель на основі еквівалентної схеми. Результати комп'ютерного моделювання

показали, що середня різниця між обмеженнями на потужність заряду-розряду для розробленої моделі і моделі на основі еквівалентної схеми складає 1% при заряді і 6% про розряді.

Проведено статистичний аналіз даних інтенсивності сонячної радіації для декількох регіонів України, уточнено середнє значення коефіцієнта прозорості атмосфери для цих регіонів. Отримані результати дозволяють уточнити очікувану потужність сонячних панелей для конкретних регіонів України, що необхідно при проектуванні гібридних систем енергопостачання.

Для оцінки кількості електроенергії, що може бути згенерована сонячними панелями за заданий проміжок часу для даної географічної точки, розроблено метод передбачення. Розроблений метод дозволяє оцінити «на добу наперед» кількість електроенергії, що може бути вироблена протягом одного дня сонячними панелями. Передбачення здійснюється за допомогою даних метеопрогнозу про хмарність в заданий період часу і історії метеорологічних спостережень.

Одним з елементів методу передбачення є розроблено модель процесів перетворення сонячної енергії. Розроблена модель дозволяє визначити потужність сонячних панелей з врахуванням особливостей розташування рядів сонячних панелей. Вхідними даними моделі є: позицію сонця на небі (кут нахилу, азимут); сумарну інтенсивність сонячної радіації, що падає на сонячні панелі; коефіцієнта корисної дії сонячних панелей; геометричних параметрів сонячних панелей (кут нахилу, азимут сонячних панелей, відстань між рядами).

Отримані результати використано при розробці інформаційної технології для системи підтримки прийняття рішень при управлінні енергодинамічними режимами гібридних систем електропостачання.

В третьому розділі застосовано штучні нейронні мережі і генетичні алгоритми для розв'язання задачі визначення активного складу вітрової електричної станції. Задача визначення активного складу полягає в знаходженні такого набору вітрових електричних установок, таким чином, щоб мінімізувати

відхилення між навантаженням, яке необхідно згенерувати, і потужністю вітрової електричної станції, а також максимізувати коефіцієнт ефективності активного складу. Коефіцієнт ефективності активного складу – це узагальнюючий критерій активного складу, що враховує такі параметри, як: кількість виробленої енергії, технічний стан, кількість включень та виключень, час напрацювання, і інші.

Для визначення активного складу використано повнорекурентні нейронні мережі. Досліджено три топології мережі і три способів навчання: без вчителя; з вчителем, роль якого виконує метод повного перебору; з вчителем роль якого виконує модифікований метод динамічного програмування.

Для визначення оптимальної конфігурації генетичного алгоритму досліджено комбінації з восьми методів селекції, трьох операторів схрещування і двох операторів мутації. Найкращі результати показали дві комбінації: комбінація лінійно рангового селектора з рівномірним схрещуванням; комбінація турнірного селектора з рівномірним схрещуванням.

Для перевірки ефективності досліджуваних методів, проведено комп'ютерне моделювання роботи системи управління енергетичними режимами вітрової електричної станції, з використанням кожного з методів, а саме: модифікованого методу динамічного програмування; рекурентних нейронних мереж; генетичних алгоритмів.

На основі аналізу отриманих результатів, обґрунтовано вибір методу знаходження активного складу з врахуванням параметрів часу розв'язання задачі і допустимого розміру небалансу потужностей. Отримані результати використано в процесі проектування системи підтримки прийняття рішень при управлінні енергодинамічними режимами гібридних систем електропостачання.

З метою дослідження впливу ємності акумулюючої системи на середнє відхилення потужності, тобто на різницю між сумарною генерацією електроенергії та графіком навантаження, проведено комп'ютерне моделювання режимів роботи гібридної системи електропостачання для двох моделей

акумуючої системи (розроблена модель, модель на основі еквівалентної схеми) і для трьох методів визначення активного складу (модифікований метод динамічного програмування, штучні нейронні мережі, генетичні алгоритми). Отримані результати дозволяють обґрунтувати енергетичну ємність акумулюючої системи з врахуванням допустимого розміру небалансу потужностей.

У четвертому розділі розроблено елементи інформаційної технології підтримки прийняття рішень при управлінні енергодинамічними режимами гібридних систем електропостачання. В процесі розробки використаний фреймворк Spring Boot, а також шаблони проектування: Модель-представлення-контролер (MVC); стратегія; одинак; проксі; фабрика.

При розробці використовувалися такі засоби, як: мова програмування Java; середовище розробки IntelliJ IDEA для мови програмування Java; фреймворки Spring Boot, що реалізує принцип інверсії залежностей; шаблон проектування MVC для організації архітектури системи.

Основна задача системи підтримки прийняття рішень – це надання рекомендацій диспетчеру гібридної системи електропостачання щодо управління енергодинамічними режимами роботи в умовах обмеження генерованої потужності відповідно до графіка навантаження. Для цього необхідно швидко визначати активний склад вітрової електричної станції, з цією метою програмно реалізовано набір таких методів, як: метод повного перебору, метод гілок і границь, метод динамічного програмування, модифікований метод динамічного програмування, штучні нейронні мережі, генетичні алгоритми. Розроблений елементи інформаційної технології інтегровано з SCADA-системою. SCADA-система використовується для збору, опрацювання і представлення даних диспетчеру гібридної системи енергопостачання.

Основні наукові результати дисертації отримані у формі фундаментальних та прикладних досліджень:

- Проведено аналіз літературних джерел щодо застосування інформаційних технологій для управління енергодинамічними режимами гібридних систем електропостачання за наявності поновлювальних джерел енергії, забезпечив можливість дослідити їх з визначенням переваг і недоліків, на підставі чого обґрунтувати актуальність теми, мети та задач дослідження.

- Розроблено метод короткотермінового прогнозування потужності сонячної електричної станції на базі метеорологічного прогнозу з врахуванням визначеного коефіцієнта прозорості атмосфери, що забезпечило можливість дослідження динамічних режимів генерації з метою формування рішень щодо управління гібридною системою електропостачання.

- Розроблено модель динаміки процесів заряду-розряду акумулюючої системи з врахуванням способу її реалізації, що дозволяє уточнити результати дослідження умов балансу енергії з метою формування управлінських рішень та обґрунтувати оптимальну енергетичну ємність акумулюючої системи для забезпечення можливості ефективного управління енергодинамічними процесами. Різниця між потужностями заряду-розряду для розробленої моделі і моделі на основі еквівалентної схеми не перевищує 10%.

- Удосконалено метод визначення активного складу вітрової електричної станції шляхом застосування розробленої моделі динаміки процесів заряду-розряду акумулюючої системи, що дозволяє уточнити результати визначення небалансу потужностей.

- Розроблено метод визначення активного складу вітрової електричної станції, який за рахунок використання сукупності генетичних алгоритмів і штучних нейронних мереж, забезпечує підвищення швидкодії вибору та адаптацію активного складу до умов зовнішнього середовища.

- Розроблено програмну реалізацію моделі динаміки процесів заряду-розряду акумулюючої системи, методу короткотермінового прогнозування потужності сонячної електричної станції та методу визначення активного складу,

що є елементами інформаційної технології управління енергодинамічними режимами за наявності поновлювальних джерел енергії.

- Реалізовано інформаційну технологію управління енергодинамічними режимами за наявності поновлювальних джерел енергії, яка завдяки використанню розроблених методів, моделей та засобів, підвищує ефективності управління енергодинамічними режимами гібридної системи електропостачання.

**Ключові слова:** гібридна система електропостачання, активний склад вітрової електричної станції, рекурентна нейрона мережа, генетичний алгоритми, акумулююча система, система підтримки прийняття рішень.

## **ABSTRACT**

*Melnyk R. V.* Information technology for control of energy-dynamic modes in the presence of renewable energy sources. – Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

The dissertation for obtaining a scientific degree of the Doctor of Philosophy on the specialty 122 “Computer science” (12 – Information technologies). – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2021.

### **Abstract content**

In the dissertation the actual scientific task is solved: increase of efficiency of management of energy-dynamic modes of hybrid wind-solar power supply system in the presence of a accumulating element by development of information technology for decision support system.

The first section analyzes the modern approaches to the control of energy-dynamic regimes of hybrid wind-solar power supply systems in the presence of a storage element. The main tasks and problems that arise in the management process are identified, on the basis of which the list of main research tasks is formed.

The capacity of wind, solar or hybrid power systems may be limited by the network manager in order to maintain the energy balance. In terms of electricity production in accordance with the limitations of the network manager and in terms of changes in environmental parameters (wind speed, solar radiation intensity, etc.) the task of determining the active composition, a set of wind turbines or solar panels that would ensure energy balance taking into account their efficiency.

The analysis of existing methods of formalization and methods of determining the active composition of a wind power plant is carried out. It has been found that the modified dynamic programming method currently shows some of the best results in terms of accuracy and speed. It is substantiated that the use of such as artificial neural networks and genetic algorithms to solve the problem of finding the active composition is a promising area of research.

The relevance of the dissertation topic is confirmed, the goal is formulated and the content of the tasks that need to be solved to achieve this goal is specified.

The second section investigates the process of control of energy-dynamic modes of a hybrid power supply system in the presence of a storage element. Based on the analysis of modern approaches to the management of hybrid systems, a set of production rules has been developed, which allows to substantiate the moments of implementation of control influences in order to change the modes of operation of the elements of the power supply system.

A model of the charge-discharge process of the accumulating element is used, which is used to model the operation of the hybrid power supply system and to form recommendations for the dispatcher. In contrast to the existing models, which require a large number of nonlinear dependences and various electro physical parameters, the developed model allows to achieve satisfactory accuracy with fewer computing. To check the correctness of the developed model, a model based on an equivalent scheme was used. The results of computer simulations showed that the average difference between the charge-discharge power limits for the developed model and the model based on the equivalent scheme is 1% for charge and 6% for discharge.



The statistical analysis of data of intensity of solar radiation for several regions of Ukraine is carried out, the average value of coefficient of transparency of the atmosphere for these regions is specified. The obtained results allow to specify the expected capacity of solar panels for specific regions of Ukraine, which is necessary when designing hybrid power supply systems.

To estimate the amount of electricity that can be generated by solar panels for a given period of time for a given geographical point, a prediction method has been developed. The developed method allows to estimate "the day in advance" the amount of electricity that can be produced in one day by solar panels. Prediction is made using meteorological data on clouds in a given period of time and the history of meteorological observations.

One of the elements of the prediction method is the developed model of solar energy conversion processes. The developed model allows to determine the power of solar panels taking into account the peculiarities of the location of rows of solar panels. The input data of the model are: the position of the sun in the sky (angle, azimuth); the total intensity of solar radiation falling on solar panels; efficiency of solar panels; geometric parameters of solar panels (angle, azimuth of solar panels, distance between rows).

The obtained results were used in the development of information technology for the decision support system in the management of energy-dynamic modes of hybrid power supply systems.

The third section uses artificial neural networks and genetic algorithms to solve the problem of determining the active composition of a wind power plant. The task of determining the active composition is to find such a set of wind power plants, so as to minimize the deviation between the load to be generated and the power of the wind power plant, as well as to maximize the efficiency of the active composition. The efficiency of the active composition is a generalized criterion of the active composition, which takes into account such parameters as: the amount of energy produced, technical condition, the number of inclusions and exclusions, operating time, and others.

Full-recurrent neural networks were used to determine the active composition. Three network topologies and three learning methods have been studied: without a teacher; with the teacher, whose role is performed by the method of complete search; with the teacher whose role is performed by a modified method of dynamic programming.

To determine the optimal configuration of the genetic algorithm, combinations of eight selection methods, three crossing operators, and two mutation operators were investigated. The best results were shown by two combinations: a combination of a linear-rank selector with uniform crossing; combination of tournament selector with uniform crossing.

To test the effectiveness of the studied methods, computer modeling of the power control system of the wind power plant, using each of the methods, namely: a modified method of dynamic programming; recurrent neural networks; genetic algorithms.

Based on the analysis of the obtained results, the choice of the method of finding the active composition is substantiated taking into account the parameters of the problem solving time and the allowable size of the power imbalance. The obtained results were used in the process of designing a decision support system in the management of energy-dynamic modes of hybrid power supply systems.

In order to study the effect of storage capacity on the average power deviation, ie the difference between total electricity generation and load schedule, computer simulations of the modes of operation of the hybrid power supply system for two models of the storage element (developed model, model based on equivalent circuit) and for three methods for determining the active composition (modified method of dynamic programming, artificial neural networks, genetic algorithms). The obtained results allow to substantiate the energy capacity of the accumulating element taking into account the allowable size of the power imbalance.

The fourth section develops elements of information technology for decision support in the management of energy-dynamic modes of hybrid power supply systems.

The Spring Boot framework was used in the development process, as well as design templates: Model-view-controller (MVC); strategy; singleton; proxy; factory.

The development used such tools as: Java programming language; IntelliJ IDEA development environment for Java programming language; Spring Boot frameworks, which implements the principle of dependence inversion; MVC design template for system architecture organization.

The main task of the decision support system is to provide recommendations to the dispatcher of the hybrid power supply system on the management of energy-dynamic modes of operation in terms of limiting the generated power in accordance with the load schedule. To do this, it is necessary to quickly determine the active composition of the wind power plant, for this purpose a set of methods such as: full search method, branch and boundary method, dynamic programming method, modified dynamic programming method, artificial neural networks, genetic algorithms. Developed elements of information technology are integrated with the SCADA-system. The SCADA system is used to collect, process and present data to the hybrid power system manager.

The main scientific results of the dissertation are obtained in the form of basic and applied research:

- The analysis of literature sources on the use of information technology to control the energy dynamics of hybrid power supply systems in the presence of renewable energy sources, provided an opportunity to explore them to identify advantages and disadvantages, to justify the relevance of the topic, goals and objectives of the study.

- A method of short-term forecasting of solar power plant capacity based on meteorological forecast taking into account a defined coefficient of atmospheric transparency was developed, which provided an opportunity to study dynamic generation modes to form solutions for hybrid power system management.

- A model of the dynamics of charge-discharge processes of the accumulating element is developed taking into account the method of their implementation, which

allows to specify the results of research of energy balance conditions in order to form management decisions and substantiate the optimal energy capacity of the accumulating element. The difference between the charge-discharge capacities for the developed model and the model based on the equivalent scheme does not exceed 10%.

- The method of determining the active set of a wind power plant has been improved by applying the developed model of the dynamics of charge-discharge processes of the storage system, which allows to clarify the results of determining the power imbalance.

- A method for determining the active set of a wind power plant has been developed, which, through the use of a set of genetic algorithms and artificial neural networks, provides an increase in the speed of selection and adaptation of the active set to environmental conditions.

- Software implementation of the model of dynamics of charge-discharge processes of the storage system, the method of short-term forecasting of solar power plant capacity and the method of determining the active set, which are elements of information technology for energy management in the presence of renewable energy sources.

- Implemented information technology for management energy-dynamic modes in the presence of renewable energy sources, which through the use of developed methods, models and tools, increases the efficiency of management for hybrid power supply system.

**Keywords:** hybrid power supply system, active composition of wind power station, recurrent neural network, genetic algorithms, battery energy storage systems (BESS), decision support system

### **Список публікацій здобувача**

*Стаття у науковому фаховому виданні України, яке включено до міжнародної наукометричної бази (Index Copernicus):*

1. Кравчишин В. С., Медиковський М. О., Мельник Р. В., Шуневич О. Б. Дослідження режимів управління енергодинамічними процесами в системах електропостачання за наявності акумулюючих елементів. Науковий вісник НЛТУ України. 2016. Вип. 26.7 . С. 291–298.

*Стаття у науковому періодичному виданні іншої держави:*

2. Medykovskyy M., Melnyk R. Processing of data on the intensity of solar radiation for solar power plant management systems. Econtechmod. 2018. Vol. 7, № 3. P. 33–38.
3. Shakhovska N., Medykovskyy M., Melnyk R., Kryvinska N. Optimization of the active composition of the wind farm using genetic algorithms. Computers, Materials & Continua. 2021. Vol.69, No.3. P. 3065–3078.

*Статті у наукових фахових виданнях України:*

4. Kravchyshyn V., Medykovskyy M., Melnyk R. Modification of the dynamic programming method in determining active composition of wind power stations. Computational Problems of Electrical Engineering. 2016. Vol. 6, № 2. P. 83–90.
5. Medykovskyy M., Melnyk R. Modeling of the energy-dynamic modes of a wind farm with a battery energy storage system (BESS). Computational Problems of Electrical Engineering. 2021. Vol. 11, № 1.
6. Медиковський М., Мельник Р., Дубчак М. Нейромережевий метод визначення активного складу вітрової електричної станції. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Інформаційні системи та мережі. 2020. Вип. 8. С. 55–64.

*Матеріали конференцій у збірниках, які включено до міжнародної наукометричної бази (Scopus):*

7. Kravchyshyn V., Medykovskyy M., Melnyk R., Dilai M. Optimization of wind farm structure control. Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC). 2018. Vol. 689 : Advances in Intelligent Systems and Computing II. Selected papers from the International conference on computer science and

information technologies, CSIT 2017, September 5-8 Lviv, Ukraine. P. 320–333.

*Наукові публікації у збірниках матеріалів та тез конференцій:*

8. Melnyk R. Research of the energy-dynamic modes in power supply systems with the battery energy storage system / Medykovskyy M., Melnyk R. // VIII International Scientific and Practical Conference "current trends of modern scientific research", March 14-16, 2021 Munich, Germany, pp. 210-218.
9. Медиковський М. О. Інформаційна технологія моделювання енергодинамічних режимів вітрової електричної станції за наявності акумулюючого елемента / Медиковський М. О., Мельник Р. В. // Fundamental and applied research in the modern world. Abstracts of the 7th International scientific and practical conference. BoScience Publisher. Boston, USA. 2021, pp. 466-471.
10. Melnyk R. Method of optimizing the parameters of the photovoltaic solar power plant / Medykovskyy M., Melnyk R. // Computer Science and Information Technologies XIV International Scientific and Technical Conference.– м. Львів, Україна.– 17-20 вересня 2019 року: тези конференції. Львів. 2019.– с. 72-75.
11. Мельник Р. В. Аналіз алгоритмів оцінювання ефективності сонячних електростанцій / Мельник Р. В. // 10 Міжнародна науково практична конференція «Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернатива первинним джерелам енергії в регіоні».– м. Львів, Україна.– 4-5 квітня 2019 року.