

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Кравчишин Віталій Степанович**

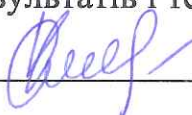
УДК 004.[891+942]

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ КОМПЛЕКСНОЮ**  
**СИСТЕМОЮ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ**

05.13.06 – інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

 Кравчишин В.С.

**Науковий керівник** – Медиковський Микола Олександрович, доктор технічних наук, професор

Львів – 2019

## АНОТАЦІЯ

*Кравчишин Віталій Степанович.* Інтелектуалізація управління комплексною системою генерації електричної енергії. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології (122 – Комп'ютерні науки) Національний університет “Львівська політехніка” МОН України, Львів, 2019.

Непостійність енергетичного потенціалу вітру зумовлює доцільність комплектації вітрових електричних станцій акумуляторами, які за необхідності, можуть використовуватися як додаткове джерело енергії, а тоді система може набуває ознак комплексної генерації. Складність проектування та експлуатації таких систем визначається особливостями режимів роботи вітрової енергоустановки, розподільчих електричних мереж та стохастичним характером процесів споживання енергії. При цьому виникає ряд нових наукових завдань, які стосуються управління енергодинамічними режимами у складній технічній системі за невизначеності параметрів швидкості вітру, енергетичної ємності акумуляторної батареї, потужності навантаження та ін.

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання: інтелектуалізація системи управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції за наявності засобів акумулювання енергії, шляхом застосування розроблених засобів підтримки прийняття рішень диспетчером, щодо набору вітрових агрегатів, які доцільно використовувати в даний час з врахуванням потреб споживачів, енергетичного потенціалу вітру та технічних характеристик акумуляторів.

Перший розділ містить огляд літературних та інформаційних джерел за темою дисертаційної роботи, аналіз сучасного стану досліджень систем керування вітровими електричними станціями. В даному розділі здійснено аналіз режимів роботи системи управління вітровою електричною станцією та визначено проблеми, які виникають при прийнятті рішень щодо можливості генерації

необхідних обсягів електричної енергії вітровою електростанцією. Проведено аналіз методів визначення активного складу вітрової електричної станції з врахуванням динаміки навантаження, енергетичного потенціалу вітру та ефективності вітрових електричних установок. На основі аналізу результатів сучасних досліджень обґрунтовано застосування технології OPC при створенні єдиного інтерфейсу для забезпечення ефективної роботи програмного продукту з пристроями або системами різних виробників. Здійснено системний аналіз засобів контролю та управління у вітроенергетиці та визначено актуальність завдання визначення диспетчером конкретної альтернативи щодо активного складу вітрової електричної станції (із можливої сукупності) за наявності інформації про можливість ВЕУ, потреби споживачів та можливість акумулятора. На підставі проведених аналітичних досліджень підтверджено актуальність теми дисертації, сформульовано мету та конкретизовано зміст завдань, які необхідно розв'язати для досягнення цієї мети.

У другому розділі розроблено модель управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції на основі бази продукційних правил з врахуванням ємності енергоакумуляуючого елемента, яка забезпечує можливість ефективно досліджувати енергодинамічні процеси з метою аналізу їх параметрів. Продукційні правила побудовано з врахуванням змін таких параметрів: швидкість вітру, навантаження споживачів, енергетична ємність акумуляторної батареї.

Обґрунтовано алгоритми управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції з використанням енергоакумуляуючого елемента, який дає змогу пом'якшити наслідки перехідних процесів в періоди критичних погодних умов або навантажень споживачів. Наявність акумуляторної батареї в структурі вітрової електричної станції розширює можливості системи, створює нові зв'язки між компонентами та забезпечує розв'язання таких основних завдань: забезпечення навантаження споживачів в періоди несприятливих погодних умов; мінімізацію перемикачів складу вітрової електричної станції з метою збільшення періоду експлуатації ВЕС та збереження технічного стану окремих ВЕУ.

Для коректної реалізації алгоритму в заданому географічному регіоні, розроблено метод статистичного аналізу швидкості вітру, який забезпечує можливість визначення ймовірнісного діапазону робочих швидкостей вітру, оцінювання співвідношення потужності ВЕС та енергоакumuлюючого елемента. Опрацювання архівних даних швидкості вітру з використанням розробленого методу за заданий період часу дає можливість з необхідною точністю оцінити ймовірність появи конкретної швидкості вітру, очікувану потужність вітрового потоку та тривалість робочої швидкості вітру за допомогою нормального розподілу та двопараметричних сімейств абсолютно неперервних розподілів таких як: розподіл Вейбула, логнормальний розподіл, гамма розподіл.

Отримані результати покладено в основу розроблення блоку інтелектуалізації системи управління вітровою електричною станцією, який забезпечує визначення критеріїв ефективності окремих ВЕУ та попереднє опрацювання вхідних даних з врахуванням технічних параметрів ВЕУ та умов експлуатації.

У третьому розділі розроблено метод визначення активного складу вітрової електричної станції, який ґрунтується на модифікації методу динамічного програмування, використовує експертні оцінки параметрів, узагальнений критерій ефективності вітрової електроустановки (оцінка стану ВЕУ на основі багатьох параметрів, серед них експерти відзначають: кількість виробленої енергії, технічний стан, кількість включень та виключень, час напрацювання, мінімальну стартову та максимальну робочі швидкості вітру), енергетичну ємність акумулюючого елемента та забезпечує можливість приймати рішення в режимі реального часу.

Застосування методу динамічного програмування для визначення набору активних вітрових електроустановок вітрової електричної станції, дає змогу з множини вітроенергетичних установок за параметрами “потужність” та “ефективність”, відібрати певну кількість таким чином, щоб отримати максимальну сумарну ефективність, при одночасному дотриманні вимог щодо сумарної

потужності набору ВЕУ, яка не перевищує навантаження споживачів. Використання класичного методу динамічного програмування зумовлює виникнення проблем із повним покриттям навантаження, оскільки в самій цільовій функції даного методу закладена умова менше або дорівнює навантаженню споживачів. Для вирішення цього завдання розглянуто два підходи.

Перший полягає в збільшенні вхідного параметру “навантаження”, на експериментально встановлений відсоток. Для цього проведено комп’ютерне симулювання роботи ВЕС. На вхід кожної ітерації подається навантаження і за допомогою методу динамічного програмування визначається набір ВЕУ, потужність ВЕС, а також значення коефіцієнта недопакування. На кожній наступній ітерації навантаження збільшується, на величину коефіцієнта недопакування отриманого на попередній ітерації. Недолік вказаного підходу полягає в тому, що коефіцієнт недопакування не є статичною величиною, а корелюється з багатьма параметрами, такими як, швидкість вітру, активний склад вітрової електричної станції. Тому, він не забезпечує точного коригування необхідної потужності.

Другий підхід – удосконалення методу динамічного програмування, шляхом введення адитивної функції мети, яка враховується на кожному кроці алгоритму та забезпечує необхідний коефіцієнт ефективності набору і мінімізує відхилення результату від заданого навантаження. При цьому формується нова цільова функція: різниця між навантаженням, яке необхідно забезпечити та потужністю ВЕС - мінімальна, а коефіцієнт ефективності вітрової електричної станції - максимальний. Використання даного методу забезпечило зменшення розкиду виробленої потужності відносно навантаження споживачів, зменшення відсотку недопакування в періоди несприятливих погодних умов, а також підвищення ефективності вітрової електричної станції.

Для верифікації досліджуваних алгоритмів, проведено комп’ютерне симулювання роботи системи управління енергетичними режимами вітрової електричної станції, з використанням кожного з методів, а саме: класичного методу

динамічного програмування, методу динамічного програмування з підвищенням вхідного параметру “навантаження” на експериментально встановлений відсоток, модифікації методу динамічного програмування.

На основі аналізу отриманих результатів обґрунтовано ефективність використання удосконаленого методу динамічного програмування для визначення активного складу ВЕС, оскільки даний метод дає змогу мінімізувати відхилення сукупної потужності ВЕС від навантаження споживачів та одночасно максимізувати ефективність вітропарку. Отримані результати використано при проектуванні систем управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції.

Розроблений метод використано при формуванні алгоритму функціонування інтелектуального блоку управління вітровою електричною станцією, який забезпечує визначення активного складу вітрової електричної станції, використовує інтелектуальну систему побудовану на продукційних правилах, для формування інформаційних порад диспетчеру, щодо управління перетоками енергії, для забезпечення навантаження споживачів, ефективного використання енергоакumuлюючого елемента та ефективного функціонування вітрової електричної станції та забезпечує відображення отриманих результатів у інтуїтивно зрозумілому вигляді. Побудовано ситуаційні карти особливостей, які надають можливість моніторингу стану системи в режимі реального часу.

У четвертому розділі реалізовано засоби інтелектуалізації автоматизованої системи управління енергетичними режимами вітрової електричної станції, які забезпечують функціонування системи підтримки прийняття рішення диспетчером при управлінні енергодинамічними режимами.

При побудові інформаційної системи використано сучасні принципи проектування програмних застосунків: наслідування, інкапсуляцію логіки, використання сучасних шаблонів проектування та фреймворків. Засобами розроблення програмного забезпечення визначено мову програмування Java та платформу розроблення SWT; шаблон проектування MVC для організації

архітектури додатку і бібліотеку Spring для проектування додатку. Для забезпечення процесів збору та опрацювання даних та диспетчерського управління, необхідною умовою є автоматизація процесів з використанням SCADA – систем, які забезпечують можливість інтеграції з іншими відкритими системами, а також модульність – можливість замінити частину системи аналогічними модулями іншого виробника. Розроблена інформаційна система управління побудована з використанням OPC UA стандарту, який може бути інтегрований у сучасні SCADA – системи. В системі передбачено засоби зберігання інформації про стан системи на момент прийняття рішення, для аналізу результатів в певних часових проміжках, параметри ВЕУ, основні параметри ВЕС, значення вагових коефіцієнтів важливості, навантаження споживачів.

Здійснено комп'ютерне симулювання роботи системи управління вітровою електричною станцією, з використанням тестових даних та досліджено залежність кількості перевизначень активного складу вітрової електричної станції від енергетичної ємності енергоакumuлюючого елемента, яке дає змогу економічного та технічного обґрунтування ємності акумуляторної батареї. Поведінку системи в часі відтворено засобами дискретно-подієвого моделювання. На підставі аналізу проведених експериментів встановлено, що застосування інтелектуалізованої системи управління з використанням модифікованого методу динамічного програмування зменшує відхилення виробленої потужності ВЕС від потужності навантаження на 90%, збільшує ефективність вибраного набору на 3,04% та зменшує кількість перевизначень активного складу на 2,66% порівняно з класичним методом динамічного програмування.

Розроблено ситуаційні карти особливостей, на основі штучних нейронних мереж, які забезпечують візуалізацію вихідних параметрів в режимі реального часу, та дають змогу оперативного реагування диспетчером на критичні значення параметрів навантаження та потужності вітрової електричної станції.

**Ключові слова:** динамічне програмування, вітрова електрична станція, активний склад вітрової електричної станції, енергоакumuлюючий елемент,

інтелектуальна система побудована на правилах, система підтримки прийняття рішень.

## **ABSTRACT**

Kravchyshyn V. S. Intellectualization of management of the complex system of electric energy generation. Proficiency scientific treatise on the rights of the manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the candidate of sciences (Ph.D.) degree in technical sciences on specialty 05.13.06 «Information technologies» (122 – Computer Sciences). - Lviv Polytechnic National University, Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019

The changeability of the wind energy potential causes the expediency of equipment of wind power stations with batteries, which can be used as an additional source of energy when necessary if necessary.

The complexity of the design and using of such systems is determined by the features of the operating modes of a wind turbine, distribution electrical networks and the stochastic nature of the energy consumption processes. In this case, a number of new scientific problems arise which are relating to the management of energy dynamical processes in the complex technical system with uncertainty wind speed parameters, the battery capacity, the load capacity, etc.

In the dissertation work the solution of a scientific problem is presented, intellectualization of the system for management power dynamic processes of the wind power station which contains energy storage by using the developed decision support system which make decisions about wind turbines set advisable to use taking into account the consumers needs, wind energy potential and technical characteristics of batteries.

The first section of the thesis contains the review of literature and information sources on the topic of the thesis and an analysis of the current state of research of wind power stations control systems. In this section, the analysis of the working modes of the wind power stations control system is carried out and the problems that arise which deciding on the possibility of generation required power volume by the wind power station are defined. The analysis of methods of defining active composition of wind power



station, which takes into account load dynamic, wind energy potential and efficiency of each wind turbine is carried out. Based on the analysis of modern research, the use of OPC technology in creating a unified interface for the effective work of a software product with devices or systems of different makers has been substantiated. Using of this standard ensures the unification of the developed tools for controllers of different makers. Next, a system analysis of control and management tools of renewable energy sources (in particular in wind power engineering) was carried out. The relevance of the task of determining by operator a specific alternative regarding the active composition of the wind power station (from a possible set) was determined which take into account information about the possibilities of the wind turbine, consumers needs and the readiness of the battery. Based on the conducted analytical researches, the relevance of the topic of the dissertation was confirmed, the goal was formulated and the content of the tasks, which are needed to solve to achieve this goal, was formulated.

In the second section, a model of management of energy-dynamic processes of a wind power station based on the production rules, which consider the battery capacity and provides an opportunity to effectively manage the existing generation capabilities to meet the consumers' needs, is developed. Production rules are constructed taking into account the changes of such parameters: wind speed, load of consumers, battery power capacity.

The algorithms of management of energy dynamical processes of a wind power station with battery are substantiated. They allows to mitigating the effects of transient energy-dynamic processes during periods of critical weather conditions and consumers loads.

The including of a battery in the wind power station structure extends the capabilities of the system, creates new connections between the components and provides the solutions for the following main tasks: provision the consumers load during periods of adverse weather conditions; minimization of switchings of imula composition of the wind power station in order to increase their works period and to improve the technical state of individual wind turbines. For correct implementation of the algorithm in a specific

geographic region, a method of statistical analysis of wind speed is developed, and it provides the ability to determine the probabilistic wind speed range and to estimate the ratio between power of wind power station and battery capacity. The processing of archival wind speed data for a specific time period allows with high accuracy describe the distribution of the probability density of the repeatability frequency of the wind speed using differential distribution and two-parameter families of continuous distributions such as: log-normal distribution, gamma distribution, Weibull distribution. Using of distributions density functions makes it possible more accurately estimate the probability of a specific wind speed value, the expected wind power value and the duration of the specific wind speed value. The obtained results are the basis for the development of an intellectualization unit for a wind power station management system. It is based on a developed model that provides the obtaining and preliminary processing of input values taken from sensors and technical parameters of the wind turbine, the consumers load values asked by the dispatcher.

In the third section, a method for determining the active composition of a wind power station is developed. Method based on the modification of the dynamic programming method, expert estimates of parameters and uses generalized wind turbine efficiency criteria, available battery capacity and provides the opportunity to make real time decisions.

Using of the dynamic programming method to determine the active composition of the wind power station enables to select from the wind turbines set a certain amount to obtain a maximum total efficiency and total power of the wind turbines set, which does not exceed the load of consumers. Using of the classical dynamic programming method causes a problem with full load coverage, since a target function contains the condition that consumer's load should to be bigger or equal to wind power station power.

To solve this problem two approaches are considered. The first approach is to increase the input "load" parameter on the experimentally determined percentage. First of all a computer simulation of the wind power station work is carried out. At the input of each iteration, the load value is given and using dynamic programming method an active

composition of wind power station, wind power station power and the mean delta difference between the consumers load and the wind power station power are determined. At every next iteration, the load is increased on the mean delta difference obtained in the previous iteration. The disadvantage of this approach is that the mean delta difference is not a static value and correlates with many parameters such as: wind speed value, composition of a wind power station, the average number of active wind turbines, and therefore it is difficult to ensure a balance of generation and consumption.

The second approach is to improve dynamic programming method to solve the task of backpack packing for determining the active composition of the wind power station. It realized by including an additive goal function, which is taken into account at each step of the algorithm and provides the necessary efficiency coefficient of active composition of wind power station and minimizes the deviation of the result from the given load. In this case, a new target function is formed: the difference between the needed load and the wind power station capacity - is minimum, and the efficiency of the wind power station - is maximal. Using of this method provides a reduction between the generated capacity distribution and to the consumers load, a decrease the percentage delta deviation during periods of adverse weather conditions, and increase the efficiency of a wind power station.

For verification of the researched algorithms, a computer simulation of the control system of the wind power station was carried out, using each of the methods: the classic dynamic programming method, the method of dynamic programming with an increase of input "load" parameter on the experimentally determined percentage and the modification of the dynamic programming method.

Based on the analysis of the obtained results, the efficiency of using the advanced dynamic programming method for the determination active composition of the wind power station is substantiated. This method adds an opportunity to minimize the deviation of the total power of wind power station from the consumers load and to maximize the efficiency of the wind power station. The obtained results are used in the design of control systems of a wind power station.

The developed method is used to format the algorithm of the intelligent control block of the wind power station. It provides determination of the active composition of the wind power station, uses an intelligent system built on product rules, to formulate additive tips to the dispatcher about managing of the energy flow, to ensure the consumers load, the efficient use of battery and the effective operation of the wind power station and provides the reflection of the results in intuitively understandable mode and provides for the construction of situational maps of the features that gives an opportunity to monitor system status in real time.

In the fourth section the intellectualization tools of the automated control system of the wind power station are developed, which ensure the functioning of the decision support system in the management of energy dynamical processes.

The construction of the information system applies modern principles of designing software applications: inheritance, logic encapsulation, analysis, use of modern design patterns and frameworks. Software development tools: the Java and SWT development platform, MVC Design Template for an application architecture organization and Spring library for designing an application. To ensure the processes of gathering and finishing data and dispatch control, the necessary condition is the automation of processes using SCADA - systems that provide the ability to integrate with other open systems and modularity - the ability to replace part of the system with similar modules of another manufacturer. Information system, which have developed, is built with the OPC UA standard, which can be integrated into modern SCADA systems.

The system provides tools of saving information about the condition of the system at the time of the decision, for analyzing the results at certain time intervals, the wind turbine parameters, the main parameters of the wind power station, the value of weighting importance coefficients, the consumers load.

A computer simulation of the wind power station control system work is carried out using test data. Dependence between number of determinations of the active composition of wind power station and battery energy capacity is investigated, which provides the economic and technical substantiation of the capacity of the battery. The behavior of the

system in time is reproduced via discrete-event simulation. As the result, using of developed intellectualization tools for control system increases the average efficiency of the selected set by 3,04%, the average deviation between wind power station power (with battery) and consumers load decreases by 90%.

Situational maps of features based on artificial neural networks, which provide visualization of the output parameters in the real time, and allow the operator to react promptly to the critical values of the consumers load and wind power station power are developed.

**Key words:** dynamic programming, wind power station, active composition of wind power station, battery, intelligent system built on rules, decision support system.

### Список публікацій здобувача

#### Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Kravchyshyn V. Optimization of wind farm structure control / V. Kravchyshyn, M. Medykovskyy, R. Melnyk, M. Dilai // Advances in Intelligent Systems and Computing II.– Selected Papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2017.– Springer.– Vol. 689.– pp. 320-333
2. Kravchyshyn V. Modification of the dynamic programming method for determining active structure of wind power plant / V. Kravchyshyn, M. Medykovskyy, R. Melnyk // Journal of Computational Problems of Electrical Engineering 2016.– Volume 6, Number 2.– pp. 83-90
3. Кравчишин В.С. Дослідження режимів управління енергодинамічними процесами в системах електропостачання за наявності акумулюючих елементів / Кравчишин В.С., Медиковський М.О., Мельник Р.В., Шуневич О.Б. // Науковий вісник НЛТУ України, 2016.– т. 26, № 7 .– с. 291 – 298
4. Кравчишин В. С. Моделювання енергетичного потенціалу вітрової електричної станції / В. С. Кравчишин, М. О. Медиковський, М. О. Галушак // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Інформаційні системи та мережі.– 2016.– № 854.– с.80-87

5. Medykovskyj M. Analysis and modeling of load parameters of wind power station / M. Medykovskyj, V. Kravchyshyn, O. Shunevych // ECONTECHMOD. AN INTERNATIONAL QUARTERLY JOURNAL .– Lublin – Rzeszow .– 2015.– Vol. 04, No. 2, pp. 19–24
6. Медиковський М. О. Методи та алгоритми опрацювання стратегічних даних / М. О. Медиковський, О. І. Цмоць, В. С. Кравчишин // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. - 2013. - Вип. 69. - С. 131-140
7. Медиковський М. О. Методи оперативного опрацювання даних в інтегрованих системах автоматизованого управління енергоефективністю регіону / М. О. Медиковський, І. Г. Цмоць, В. С. Кравчишин // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова “Моделювання та інформаційні технології”.– 2013.– Вип. 68.– с. 176-183
8. Кравчишин В.С. Управління вітровою електричною станцією за наявності акумулюючого елемента / Кравчишин В.С., Медиковський М.О. // Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту ISDMCI'2016 : зб. наук. пр. міжнар. наук. конф.– 24–28 трав. 2016.– Залізний Порт, Україна.– с 83-85
9. Medykovskyu M. Structure optimization of wind power system / Medykovskyu Mykola, Shunevych Oleh, Kravchyshyn Vitaliy // papers of the Xth International Conference “Perspective technologies and methods in mems design”.– MEMSTECH-2014.– Lviv: NULP.– 2014.– p. 111
10. Медиковський М. Моделювання вхідних параметрів системи управління вітровою електростанцією / М. Медиковський, В. Кравчишин, О. Шуневич // матеріали XI Міжнародної наукової конференції "Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2015)", Залізний Порт, Україна, 25-28 травня 2015.– с. 113-115
11. Kravchyshyn V. Analysis of modeling methods of wind energy potential of a region / Vitalii Kravchyshyn, Mykola Medykovskyj // The papers of 11th International Scientific

and Technical Conference “Computer Sciences and Information Technologies” (CSIT’2016), September 6-10.– 2016.– Lviv, Ukraine.– pp. 175-178

12. Kravchyshyn V. Modeling of input load’s parameters of control system of wind power system / Vitaliy Kravchyshyn, Mykola Medykovskyj, Oleh Shunevych // 16th International conference “Computational Problems of Electrical Engineering”.– CPEE 2015.– Lviv Polytechnic National University.– Lviv, Ukraine.– 2-5 September 2015.– pp.116-117

13. Kravchyshyn V. Methods of prediction of wind speed / Vitaliy Kravchyshyn, Mykola Medykovskyj, Oleh Shunevych // The papers of 9th International Scientific and Technical Conference “Computer Sciences and Information Technologies” (CSIT’2014), November 18-22, 2014, Lviv, Ukraine.– pp. 160-161

14. Kravchyshyn V. Using of neural networks in problems of forecasting wind speed values / Vitalii Kravchyshyn, Mykola Medykovskyj // Автоматика – 2017: XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління.– м. Київ, Україна.– 13–15 вересня 2017 року: тези конференції. Київ. 2017.– с. 183-185

15. Кравчишин В.С Інтелектуальні засоби прогнозування швидкості вітру / Кравчишин В.С, Медиковський М.О., Шуневич О.Б. // Матеріали другої міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК” – Київ: НУБІП, 2014.– с. 34

16. Медиковський М. О. Особливості оперативної обробки даних в інформаційно-аналітичній системі оцінювання енергоефективності промисловості регіону / М. О. Медиковський, І. Г. Цмоць, В. С. Кравчишин // Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту ISDMCI’2013 : зб. наук. пр. міжнар. наук. конф., 20–24 трав. 2013 р., Євпаторія, Україна / Ін-т кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України. – Херсон, 2013. – С. 207–209

## ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	16
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	18
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1.....	28
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОДИНАМІЧНИМИ РЕЖИМАМИ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ.....	28
1.1 Перспективи розвитку та особливі режими роботи відновлювальних джерел енергії...28	
1.1.1 Основні параметри сучасних вітрових електроустановок.....	31
1.2 Структура систем, можливості комплексної генерації електроенергії. ....	34
1.2.1 Автономні вітрові електричні станції.....	34
1.2.2 Комплексні системи генерації електричної енергії.....	38
1.2.3 Методи та засоби оцінювання вітрового енергетичного потенціалу .....	39
1.3 Аналіз режимів систем контролю та управління комплексною генерацією електричної енергії.....	42
1.3.1 Автоматизовані системи диспетчерського управління в енергетиці.....	42
1.3.2 Перспективні завдання в управлінні сучасними вітровими електричними станціями.	48
1.3.3 Аналіз методів визначення активного складу вітрової електричної станції.....	49
1.4 Технології управління системою комплексної генерації на базі вітрової електричної станції .....	53
1.5 Обґрунтування актуальності теми і завдань дослідження.....	57
Висновки до розділу 1 .....	58
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГОДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГОАКУМУЛЮЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА	60
2.1 Інтелектуалізація управління енергоакумулюючим елементом в структурі вітрової електричної станції .....	60
2.1.1 Розроблення методу управління вітровою електричною станцією за умов невизначеності параметрів режиму.....	61
2.1.2 Розроблення бази продукційних правил управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції. ....	66
2.2 Моделювання енергетичного потенціалу вітрової електричної станції.....	69
2.3 Розроблення методу короткотермінового прогнозування швидкості вітру.....	76
Висновки до розділу 2 .....	89
3. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОГО СКЛАДУ ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ.....	91
3.1 Дослідження енергодинамічних процесів вітрової електроустановки.....	91
3.2 Багатокритеріальне оцінювання ефективності вітрової енергоустановки.....	94
3.3 Формулювання завдання визначення активного складу вітрових електричних установок	98
3.4 Ефективність методів розв’язання задачі пакування рюкзака при визначенні активного складу вітрової електричної станції.....	99



3.5 Модифікація методу динамічного програмування для визначення активного складу вітрової електричної станції. ....	110
3.6 Структурна схема алгоритму управління вітровою електростанцією.....	116
3.7 Дослідження роботи алгоритмів системи управління вітровою електричною станцією ..	117
Висновки до Розділу 3 .....	122
<b>4. РОЗРОБЛЕННЯ ЗАСОБІВ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОДИНАМІЧНИМИ РЕЖИМАМИ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ..</b>	<b>124</b>
4.1 Обґрунтування засобів для інтелектуалізації системи управління .....	124
4.2 Загальна характеристика системи підтримки прийняття рішень.....	131
4.2.1 Архітектура СППР .....	133
4.3. Дослідження режимів роботи системи управління вітровою електричною станцією.....	144
4.4. Статистичний аналіз отриманих результатів .....	149
Висновки до розділу 4 .....	155
<b>ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.....</b>	<b>156</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>158</b>
<b>ДОДАТОК А.....</b>	<b>173</b>
Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	173
<b>ДОДАТОК Б .....</b>	<b>176</b>
<b>ДОДАТОК В.....</b>	<b>183</b>
<b>ДОДАТОК Г Фрагмент програмного коду розробленого ПЗ .....</b>	<b>188</b>
<b>ДОДАТОК Д Акти впровадження результатів дисертаційних досліджень .....</b>	<b>193</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

Позначення	Пояснення
ВЕУ	вітрова електроустановка
ВЕС	вітрова електростанція
АБ	акумуляторна батарея
ЕАЕ	енергоакумуючий елемент
АСДУ	автоматизована система диспетчерського управління
АСУ	автоматизована система управління
АСУ ТП	автоматизована система управління технологічним процесом
СППР	система підтримки прийняття рішень
ШНМ	штучна нейронна мережа
ОПР	особа, що приймає рішення
ПДЕ	поновлювані джерела енергії
ПЗ	програмне забезпечення
ТДЕ	традиційні джерела енергії
ГЕС	гідроелектростанція
ККД	коефіцієнт корисної дії
КДП	класичний метод динамічного програмування
МДП	модифікація методу динамічного програмування
MVC	архітектурний шаблон, який використовується для проектування програмного забезпечення та передбачає поділ на три взаємопов'язані частини: модель даних, вигляд та модуль керування.
API	прикладний програмний інтерфейс
COM	модель компонентного об'єкта
OLE	технологія зв'язування і вбудовування об'єктів в інші документи і об'єкти

OPC	стандартний інтерфейс доступу до даних з сторони ПЗ верхнього рівня
OPC UA (Unified Architecture)	(Уніфікована архітектура OPC), остання за часом випуску специфікація яка надає крос-платформну сумісність.
SCADA	програмний пакет, призначений для розробки або забезпечення роботи в реальному часі систем збору, обробки, відображення та архівування інформації про об'єкт моніторингу або управління.

## ВСТУП

### **Актуальність роботи.**

Раціональне використання поновлювальних джерел енергії є одним із важливих напрямів розвитку економіки. При реалізації сучасних вітрових електричних станцій, які за наявності енергоакумулюючого елемента можна віднести до комплексних систем генерації електричної енергії, необхідно враховувати можливості існуючих систем електропостачання, сучасних особливостей процесів споживання електроенергії та обмеження щодо можливості використання вітрових електричних установок (ВЕУ). Цим зумовлюється складність проектування та експлуатації таких систем. Ефективним елементом усунення (пом'якшення) ряду таких обмежень є застосування засобів акумулювання електричної енергії. Але при цьому виникає ряд нових наукових завдань, які стосуються управління енергодинамічними процесами у складній технічній системі за невизначеності окремих параметрів.

Сучасний стан розвитку автоматизованих систем диспетчерського управління (АСДУ) енергодинамічними режимами потужних вітрових електростанцій (ВЕС) характеризується тим, що крім завдань виробництва електроенергії згідно з заданим графіком одночасно таким об'єктам ставляться завдання компенсації реактивної потужності, покриття пікових навантажень, тощо. Причому, реалізація таких режимів нерідко відбувається за умов невизначеності багатьох параметрів.

Відомі наукові результати, на яких базуються алгоритми функціонування автоматизованих систем диспетчерського управління складними енергетичними системами (Руденко Ю.М. (основи автоматизованого оперативного управління великими енергетичними системами), Веніков В.А. (моделювання потужних енергетичних систем, стійкості електроенергетичних систем, методів їх автоматичного регулювання режимів), Сергієнко І.В (дослідження моделей і методів дискретної оптимізації, розробка інтелектуальних технологій для вирішення завдань трансобчислювальної складності, автоматизація процесів

обробки і аналізу даних математичними методами), Беллман Р (основи динамічного програмування) та ін.) [29, 88].

Разом з тим, такі особливості структури вітрової електростанції як: розподіленість елементів ВЕС на значних площах; наявність у їх структурі вітрових установок (ВЕУ) з різними номінальними параметрами, різною готовністю до використання; випадковий характер первинного енергетичного потенціалу; різні функції, які виконують елементи ВЕС, енергетична ємність акумулятора, не дають змоги безпосередньо застосовувати відомі результати для коректного аналітичного розв'язування оптимізаційних завдань, зокрема, щодо формування активного складу вітрової електростанції, тобто визначення множини ВЕУ, які необхідно задіяти в даний час для генерації енергії. Водночас, відомі методи обґрунтування складу ВЕС застосовуються переважно для одноразового аналізу параметрів енергодинамічного режиму роботи. При цьому не розглядаються умови покриття потреб споживачів з активним використанням акумуляторів у складі ВЕС.

Аналіз сучасних результатів досліджень свідчить, що для удосконалення технологічних процесів та автоматизації процесу підтримки прийняття рішень перспективним напрямом є інтелектуалізація систем управління (Бідюк П.І. – розроблення і реалізація інформаційних систем підтримки прийняття рішень на основі сучасних методів обробки даних, математичного моделювання, прогнозування та прийняття рішень, Філатов В.О. – інформаційні системи, інтелектуальний аналіз даних, Поспелов Д.А. – нові методи управління складними системами, дослідження проблем інтелектуальної архітектури та штучних нейронних мереж, Чебан В.М. – фазове керування режимами електроенергетичних систем, Чукреев Ю.Я. – забезпечення балансової надійності при плануванні розвитку електроенергетичних систем та оперативне управління режимами їх функціонування в режимі реального часу, Стогній Б.С. – автоматизація електричних систем, розробка принципів побудови та оптимізації систем управління електроенергетичними об'єктами).

Таким чином, підвищення рівня інтелектуалізації АСДУ сучасних ВЕС за наявності енергоакумулюючого елемента шляхом розроблення засобів інтелектуальної підтримки прийняття рішень є актуальним завданням.

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

Дисертаційна робота відповідає науковому напрямку кафедри автоматизованих систем управління Національного університету “Львівська політехніка” – методи, моделі та компоненти інформаційних управляючих систем і технологій. Дисертація виконана у межах держбюджетної науково-дослідної роботи “Розроблення компонентів для синтезу інтегрованих автоматизованих систем управління”, державна реєстрація № 0114U001232 та науково-дослідної роботи кафедри автоматизованих систем управління Національного університету «Львівська політехніка»: “Інтелектуальні інформаційні технології багаторівневого управління енергоефективністю регіону”, державна реєстрація № 0117U1004450

### **Мета і завдання дослідження.**

*Метою дослідження* є інтелектуалізація системи управління енергодинамічними режимами комплексної генерації енергії сучасною ВЕС з використанням засобів підтримки прийняття рішень щодо набору (складу) вітрових агрегатів для підвищення ефективності використання енергетичного обладнання та гарантованого енергозабезпечення споживачів.

*Об'єкт дослідження* – процеси управління енергетичними режимами вітрової електростанції за наявності акумулюючого елемента з урахуванням вимог графіка навантажень та можливостей генерації енергії.

*Предмет дослідження* – методи та засоби інтелектуалізації автоматизованої системи управління (АСУ) енергетичними режимами вітрової електричної станції за наявності засобів акумулювання.

*Завдання дослідження.* Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно розв'язати такі завдання:

1. Розробити метод статистичного аналізу швидкості вітру для визначення ймовірнісного діапазону робочих швидкостей вітру, для оцінювання потужності ВЕС.
2. Удосконалити метод визначення активного складу вітрової електричної станції з оптимізацією за параметром відхилення потужності вітропарку від навантаження споживачів.
3. Розробити модель управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції на основі продукційних правил з метою зменшення числа перемикачів активного складу ВЕС та забезпечення потреб споживачів в періоди несприятливих погодних умов, за наявності засобів акумулювання енергії.
4. Дослідити вплив енергетичної ємності засобів акумулювання електричної енергії на оптимізацію режимів комплексної генерації електричної енергії.
5. Дослідити залежність кількості перевизначень активного складу вітрової електричної станції від енергетичної ємності енергоакумулюючого елемента.
6. Розробити засоби інтелектуалізації автоматизованої системи управління енергодинамічними режимами вітрових електростанцій.

*Методи дослідження.* У дисертаційній роботі використано: метод аналізу ієрархій (метод Сааті) – для визначення вагових коефіцієнтів важливості параметрів вітроенергетичної установки; методи інтегрального оцінювання систем – для визначення ефективності ВЕУ; метод статистичного аналізу швидкості вітру, з використанням двопараметричних сімейств неперервних розподілів для визначення ймовірнісних діапазонів швидкостей вітру; метод динамічного програмування для розв’язання задачі пакування рюкзака при вирішенні оптимізаційного завдання визначення набору увімкнених вітрових електроустановок; теорія штучних нейронних мереж для короткострокового прогнозування швидкості вітру та побудови ситуаційних карт особливостей для моніторингу стану системи комплексної генерації в режимі реального часу.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

У процесі розв'язання поставлених завдань отримано такі нові наукові результати:

*вперше:*

- розроблено метод статистичного аналізу швидкості вітру з використанням сімейств двопараметричних неперервних розподілів, що забезпечило можливість визначення ймовірнісного діапазону робочих швидкостей вітру, для оцінювання потужності ВЕС;

- розроблено модель управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції на основі бази продукційних правил з врахуванням ємності енергоакумуляуючого елемента, що забезпечує можливість інтелектуалізації процесів управління енергодинамічними режимами;

*удосконалено:*

метод динамічного програмування для розв'язання задачі пакування рюкзака при визначенні активного складу ВЕС введенням адитивної функції мети, що враховується на кожному кроці алгоритму та забезпечує необхідний коефіцієнт ефективності набору і мінімізує відхилення результату від заданого навантаження;

*отримав подальший розвиток:*

метод визначення активного складу вітрової електростанції, який ґрунтується на удосконаленому методі динамічного програмування, експертних оцінках параметрів, використовує узагальнений критерій ефективності вітрової електроустановки, енергетичну ємність акумуляуючого елемента та забезпечує можливість прийняття рішень в режимі реального часу.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Розроблений метод статистичного аналізу швидкості вітру з використанням сімейств двопараметричних неперервних розподілів забезпечує можливість визначення ймовірнісного діапазону робочих швидкостей вітру, для оцінювання діапазону робочих потужностей ВЕС.



Дослідження залежності кількості перевизначень активного складу вітрової електричної станції від встановленої ємності енергоакumuлюючого елемента забезпечує можливість економічного та технічного обґрунтування номінальних параметрів акумуляторної батареї.

Застосування розроблених методів та засобів, дає змогу визначати склад вітрової електростанції в режимі реального часу з врахуванням навантаження споживачів, енергетичного потенціалу вітру, потужностей ВЕС та енергетичної ємності енергоакumuлюючого елемента. Оптимізація складу вітрової електричної станції сприяє зростанню економічної та технічної ефективності використання вітрових електроустановок. Обґрунтовані та розроблені методи використані при розробці інтелектуальної інформаційної технології підтримки прийняття рішень для системи управління комплексною генерацією електричної енергії.

Результати дослідження використані в роботі ТОВ "ЕКО-ОПТИМА", при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи "Розроблення компонентів для синтезу інтегрованих автоматизованих систем управління", науково-дослідної роботи "Інтелектуальні інформаційні технології багаторівневого управління енергоефективністю регіону" та у навчальному процесі НУ "Львівська політехніка". Впровадження матеріалів досліджень підтверджено відповідними актами.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать: метод короткострокового прогнозування швидкості вітру на основі штучних нейронних мереж [1, 16], метод визначення активного складу вітрової електростанції, який ґрунтується на експертних оцінках параметрів, удосконаленому методі динамічного програмування та використовує енергетичну ємність акумуляюючого елемента [1, 2, 9], модифікація методу динамічного програмування для розв'язання задачі пакування рюкзака при визначенні активного складу ВЕС [2], аналіз особливостей застосування акумуляторних батарей у структурі вітрової електричної станції [3, 14], база

продукційних правил управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції за наявності енергоакумулюючого елемента [3], метод статистичного аналізу швидкості вітру з використанням сімейств двопараметричних неперервних розподілів [4, 15], алгоритм моделювання динаміки параметрів навантаження [5, 12, 13], аналіз методів та алгоритмів оцінювання стратегічних даних [6]; аналіз методів оперативної обробки даних в інтегрованих системах автоматизованого управління енергоефективністю регіону [7, 8], аналіз засобів прогнозування швидкості вітру [10, 11].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи представлялися на таких наукових конференціях: міжнародній науковій конференції “Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту” ISDMCI’2013 (м. Євпаторія, 2013); X міжнародній конференції “Перспективні технології і методи проектування MEMC” MEMSTECH-2014 (м. Львів, 2014); міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК” (м. Київ, 2014); міжнародній науково-технічній конференції “Комп’ютерні науки та інформаційні технології” CSIT 2014 (м. Львів, 2014); XI міжнародній науковій конференції “Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту” ISDMCI’2015 (м. Залізний Порт, 2015); 16 міжнародній конференції “Обчислювальні проблеми електротехніки” SPEE 2015 (м. Львів, 2015); XII міжнародній науковій конференції “Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту” ISDMCI’2016 (м. Залізний Порт, 2016); XI міжнародній науково-технічній конференції “Комп’ютерні науки та інформаційні технології” CSIT 2016 (м. Львів, 2016); XXIV міжнародній конференції з автоматичного управління “Автоматика 2017” (м. Київ, 2017); регулярних наукових семінарах кафедри автоматизованих систем управління Національного університету “Львівська політехніка” (2012-2016).

**Публікації.** Основні результати дослідження опубліковані в 16 наукових публікаціях, з яких 4 статті у наукових фахових виданнях України, 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав та 1 стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз, 9 тез доповідей та матеріалів конференціях.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 197 сторінок, 52 рисунки, 15 таблиць, список літератури із 192 найменувань та 5 додатків.

## РОЗДІЛ 1

### **АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОДИНАМІЧНИМИ РЕЖИМАМИ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ**

У розділі здійснено аналіз режимів роботи системи управління вітровою електричною станцією та визначено проблеми, які виникають при прийнятті рішень щодо можливості генерації необхідних обсягів електричної енергії вітровою електростанцією. Проведено аналіз методів визначення активного складу вітрової електричної станції з врахуванням динаміки навантаження, енергетичного потенціалу вітру та ефективності вітрових електричних установок. На підставі проведених аналітичних досліджень підтверджено актуальність теми дисертації, сформульовано мету та конкретизовано зміст завдань, які необхідно розв'язати для досягнення цієї мети.

#### **1.1 Перспективи розвитку та особливі режими роботи відновлювальних джерел енергії**

Задля забезпечення енергонезалежності, зменшення негативного впливу на навколишнє середовище традиційного енерговиробництва протягом кількох останніх десятиліть провідні країни світу працюють над поступовим заміщенням традиційних джерел енергії відновлювальними [59, 100].

Велика частина електричної енергії, яка споживається населенням та промисловістю України виробляється через спалювання органічних видів палива (природний газ, вугілля, нафта). Це зумовлює значне забруднення навколишнього середовища, шляхом вивільнення в атмосферу оксидів вуглецю, азоту, сірки, вуглеводних та інших шкідливих домішок.

Енергетична політика більшості країн світу направлена на зменшення негативного впливу традиційного енерговиробництва, яке призводить до глобальної зміни клімату (глобального потепління), шляхом збільшення частки відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) в своєму енергетичному секторі та поступової відмови від теплових та атомних електростанцій.

Відновлювальні джерела енергії вже декілька років поспіль перевищують за об'ємом інвестицій викопне паливо [174, 175, 176]. Глобальним лідером тут є Китай – 132,6 млрд доларів, за ним слідує США та Японія – 56,9 млрд доларів та 23,4 млрд доларів відповідно. Протягом 2017 року загалом у світі було встановлено рекордні 160 ГВт потужностей з відновлювальних джерел енергії. З яких частка вітрових електростанцій становить 56 ГВт, а сонячних електростанцій 98 ГВт [173].

Зміни у світовій енергетиці прискорюються. Так Bloomberg New Energy встановив що у 2017 році ціна за 1 МВт сонячної енергії подешевшала в порівнянні з 2015 роком на 25%. При цьому вартість впровадження таких проектів продовжує невпинно зменшуватися. Найбільші інвестиційні фонди та навіть цілі країни відмовляються інвестувати у викопну енергетику.

У світі 1,3 млрд людей не мають доступу до електроенергії, а відновлювальні джерела енергії їм таку можливість надають. Крім того вони надають можливості для вирішення проблеми глобального потепління, створення робочих місць, енергетичної безпеки.

Енергетична стратегія України передбачає істотне збільшення частки нетрадиційних та поновлювальних джерел енергії. Оновлено меморандум між Україною та ЄС з метою досягнення до 2035 року скорочення споживання енергії на 25%, збільшення частки відновлювальних джерел енергії у кінцевому енергоспоживанні до 25% та зменшення шкідливих викидів парникових газів на 35% [187].

Сучасна система стимулювання виробництва електроенергії з ВДЕ має значні успіхи. Серед них – стрімке зростання кількості приватних сонячних електростанцій, яких у 2015 році було 244, а станом на перше січня 2018 року вже 3100 українських сімей встановили сонячні батареї на дахах своїх будинків.

Україна має істотний потенціал розвитку вітрової енергетики. Найбільш перспективними для розвитку вітроенергетики є південні та південно-східні регіони країни, а також карпатський регіон, де середня швидкість вітру перевищує 5 м/с. Крім того Україна взяла курс на прискорений розвиток та виробництво

сучасних вітчизняних вітрових електроустановок (ВЕУ) мегаватного класу запровадивши так званий стимулюючий коефіцієнт, який дає додаткову надбавку в розмірі 5–10 відсотків до “зеленого тарифу” при використанні вітчизняного обладнання на об’єктах електроенергетики [189]. “Зелений” тариф це один із методів підтримки генерації електроенергії з ВДЕ, що використовувався у десятках країн. Суть його в тому, що оператор ринку викуповує таку енергію за спеціальною свідомо завищеною ціною.

При цьому, крім фінансових та економічних, важливими проблемами є технічні проблеми, пов’язані з балансуванням генерації та споживання в об’єднаній енергосистемі. Особливу увагу необхідно звертати на природню перемінність енергетичного потенціалу. Цим зумовлюються збурення у роботі SCADA систем та додаткові витрати на балансування, тобто якщо швидкість вітру зменшилась і вітрова електрична станція не видає заплановану потужність, то десь необхідно взяти електричну енергію щоб компенсувати цей спад.

За останні 2 роки в Україні було введено в експлуатацію 30% усіх потужностей відновлювальних джерел енергії, а надалі очікується продовження такого буму, оскільки інвестори намагаються реалізувати свої проекти до планового зменшення тарифу з 1 січня 2020 року. Як результат, кількість введених потужностей у 2017 році перевищила аналогічний показник 2016 року в два рази.

При цьому актуальною є і фінансова межа зростання кількості відновлювальних джерел енергії. Експерти озвучують страхітливі сценарії фінансового апокаліпсису, проте офіційних розрахунків на даний час немає. Схожа ситуація з розумінням технологічних бар’єрів об’єднаної енергосистеми України, в публічному та науковому просторі постійно озвучуються проблеми з динамікою режимів вітрових електростанцій, незважаючи на те що обґрунтовані дослідження недостатньо глибокі [187]. До оприлюднення та перевірки отриманих результатів розмови про технологічні обмеження не мають під собою жодного підґрунтя.

Якщо великі вітрові та сонячні електричні станції і потребують значних потужностей для енергетичного балансування, то ситуація з малими установками кардинально інша, оскільки такі станції не створюють жодних проблем з

балансуванням, а навпаки дають змогу підвищувати якість електричної енергії у розподільчих мережах. Такі особливості необхідно враховувати при розробленні будь-якої системи управління режимами ВДЕ.

Існуюча система підтримки виробництва електроенергії з відновлювальних джерел енергії направлена в першу чергу на великих виробників, які будують нові станції незалежно від попиту на енергію в регіонах розміщення, що в подальшому може зумовити певні проблеми з оптимізацією енергодинамічних процесів.

Ідеальних та універсальних схем підтримки відновлювальних джерел енергії не існує, кожна країна створює їх під свої потреби. Для України потреба збільшувати генерацію електроенергії з відновлювальних джерел енергії є не лише світовим трендом, а скоріше необхідністю, оскільки більша частина генерації застаріла та потребує заміни. Дискусії в суспільстві про майбутні механізми підтримки відновлювальних джерел енергії не мають обмежуватися звичайними порівняннями "зелених" тарифів та аукціонів. Потрібен комплексний підхід, який дасть змогу досягнути балансу інтересів всіх учасників ринку електроенергії та забезпечить кожному з них можливість обґрунтувати свою позицію [187].

Для вирішення проблеми розбалансування енергетичної системи важливим завданням є зменшення шкідливого впливу на систему великих вітрових електричних станцій. Для досягнення цієї мети доцільними є розроблення комплексного підходу: удосконалення методів управління такими станціями та вирішення проблеми з нестабільною подачею електроенергії шляхом введення в структуру таких станції енергоакumuлюючого елемента [60].

### **1.1.1 Основні параметри сучасних вітрових електроустановок**

На даний час на більшості діючих вітрових електричних станцій впроваджуються в експлуатацію ВЕС третього покоління, номінальна потужність яких починається від 1 МВт, це Vestas V112, Fuhrlander FL2500-100. На вітрових електричних станціях введених в експлуатацію до 2012 року використовуються ліцензійні вітрові електроустановки першого покоління USW 56-100 і значно менша кількість більш ефективних ВЕУ другого покоління типу ВЕУ Т600-48 і АВЕ-250.

Вітроустановка Fuhrlander FL2500-100 – до 2013 р вітроустановки FL2500 випускалися за технологією німецької компанії Fuhrlander AG. У 2013 році ТОВ «ФВТ Україна» придбала ліцензію у німецької проектно-дизайнерської компанії W2E (Wind to Energy) на виробництво турбін потужністю 2,05, 2,5 і 3 МВт. В Україні в процесі виробництва вітрових електроустановок задіяні шість найбільших машинобудівних заводів, серед яких ПАТ «Енергомашспецсталь», Краматорський завод важкого верстатобудування, ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» та інші.

Таблиця 1.1

## Основні параметри вітроенергетичних установок

Характеристика	перше покоління USW 56-100	друге покоління BEU T600-48	третє покоління V112/3300	3 покоління Fuhrlander FL2500-100
Номінальна потужність, кВт	107,5	600	3300	3000
Генератор	асинхронний	асинхронний	асинхронний	асинхронний
Діаметр вітроколеса(ротора) (ВК), м	17,0	48	112	100
Кількість лопатей	3	3	3	3
Довжина лопаті, м	8,32	-	-	-
Матеріал лопатей	склопластик	склопластик	склопластик	склопластик
Швидкість обертання ВК, об/мін.	72	15/23	13,8	16,5
Система орієнтації за вітром	пасивна	активна	активна	активна
Висота башти, м	18 або 24	60	80	85-160
Мінімальна стартова швидкість, м/с	5	3,5	4	3,5
Швидкість вітру для виходу номінальної потужності, м/с	13	12,5	12	12
Максимальна експлуатаційна швидкість вітру, м/с	22	25	23	25
Частота мережі, Гц	50	50	50	50/60
Початок виробництва	1995р.	2002р.	2012р.	2013



Згідно з новою доповіддю Глобальної ради з вітроенергетики Global Wind Energy Outlook - до 2030 року встановлена потужність світового вітрового енергетичного ринку може досягати 2.1 ТВт (2 млн 100 тис МВт), а її частка у світовому електропостачанні становитиме 20% [173].

Найбільшим регіональним вітроенергетичним ринком світу є Азія із загальною встановленою потужністю 175,8 ГВт. У Китаї на кінець 2015 року було встановлено 145 ГВт вітроенергетичних потужностей, що трохи менше ніж у всіх країнах Європи, вітрова енергетична потужність якої дорівнює 147,7 ГВт. До 2030 року потужність вітроенергетики в КНР може зрости до 667 ГВт, в Європі - до близько 399 ГВт, в США до 414 ГВт, а в Індії - понад 163 ГВт. Загальна потужність світової офшорної вітроенергетики за рік зросла приблизно на 35%, досягнувши понад 12 ГВт станом на початок 2016 року [173].

В кінці 2016 року Всесвітня вітроенергетична асоціація (WWEA), оприлюднила свій піврічний звіт з розвитку світової вітроенергетики, в якому зазначається, що станом на середину 2016 року сумарна потужність світового вітроенергетичного сектору досягла 456,5 ГВт, з яких 21,7 ГВт були введені в експлуатацію лише за в перші шість місяців 2016 року, тобто вітрові енергетичні установки, встановлені в усьому світі до середини 2016 року, можуть забезпечити близько 4,7% світового електропостачання [192].

В Україні за 2015 рік всіма ВЕС материкової частини було вироблено 1,125 ГВт електроенергії, що становить близько 0,73% загальної річної генерації. Протягом 2015 - 2016 років в Україні було введено в експлуатацію сумарно 25.5 МВт нових потужностей, чотири вітротурбіни Vestas V-112 введені в експлуатацію на ВЕС "Старий Самбір-1", чотири вітротурбіни FL 2500-100 на Очаківській ВЕС та одна вітрова електроустановка FL2500-100 в вітропарку Причорноморський. Станом на кінець 2016 року сумарна потужність всіх вітрових електричних станцій України склала 435.3 МВт. Всі ВЕС підключені до єдиної енергомережі України. [191].

## **1.2 Структура систем, можливості комплексної генерації електроенергії.**

Сучасні вітрові електричні станції класифікуються на основі великої кількості критеріїв, серед яких: кількість та типи вітрових електроустановок ВЕС, потужність, розміщення та галузі використання енергії отриманої з ВЕС. Залежно від розташування вітрові електричні станції поділяють на onshore – які, географічно будуються та працюють на суші та offshore – які розташовуються в морі.

Крім цього системи енергозабезпечення можуть бути розділені залежно від потужності і типу взаємозв'язків з іншими джерелами енергії на три основні типи [6, 62]: автономні, гібридні або ж комплексні та централізовані. В контексті вітрових електричних станцій доцільно розглядати автономні та комплексні типи систем.

### **1.2.1 Автономні вітрові електричні станції**

Досить широке застосування вітроенергетичних установок пояснюється їх відносно невисокими питомими капіталовкладеннями в порівнянні з іншими поновлюваними енергетичними джерелами. Особливістю автономних вітрових систем енергозабезпечення є генерація електричної енергії та забезпечення навантаження незалежно від централізованого енергопостачання. Часто такі системи використовуються для забезпечення потреб відносно малих споживачів (окремих господарств чи будинків). Дані вітрові електричні станції здебільшого здатні генерувати потужність не більше декількох кіловат, вітроустановки в даних системах мають відносно малі габарити та територіально не потребують великих площ для ефективного функціонування. Зазвичай ВЕС даного класу встановлюють в важко доступних регіонах, де централізоване електропостачання відсутнє або обмежене чи в регіонах, де використання енергії з електростанцій на основі органічних носіїв є економічно не вигідним, у зв'язку з великими витратами на транспортування, зберігання чи будь-яким іншим причинам. Основною вимогою для встановлення вітрових електричних станцій є достатній вітровий енергетичний потенціал. Вітрові електроустановки малої потужності зазвичай мають стартову швидкість вітру 3 м/с [52].

Загальний вигляд структурної схеми ВЕС, призначеної для автономного електропостачання споживачів змінним струмом показаний на рисунку 1.1.

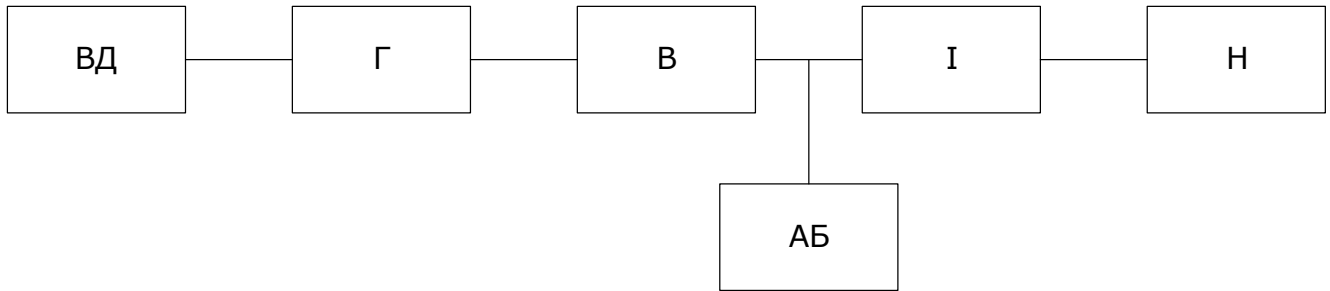


Рисунок – 1.1. Структурна схема автономної ВЕС: ВД – вітродвигун;  
Г – генератор; В – випрямно-зарядний пристрій; АБ – акумуляторна батарея;  
І – автономний інвертор; Н – електричне навантаження станції

Потужності вітроелектростанції залежно від швидкості вітру мають вигляд, поданий на рисунку 1.2.

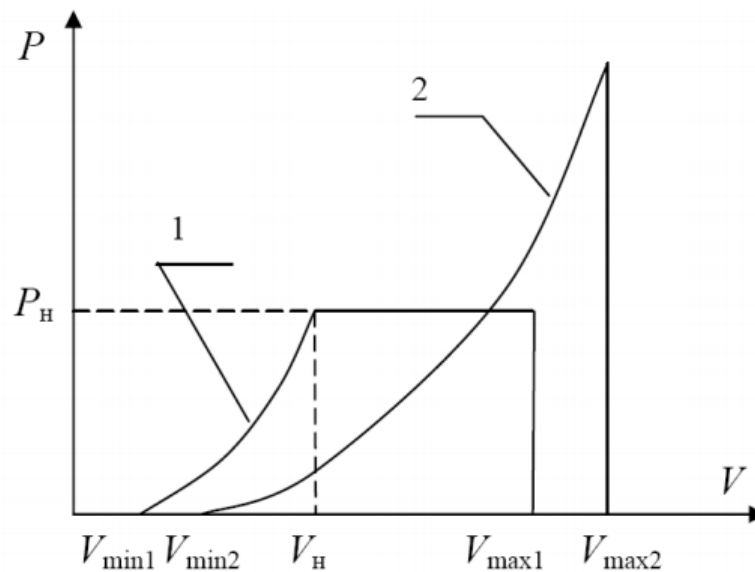


Рисунок – 1.2 Потужності вітроелектростанції: 1 - з аеродинамічним регулюванням; 2 - без аеродинамічного регулювання

Під аеродинамічним регулюванням розуміємо введення додаткового опору на вітродвигун з метою уникнення надлишкової частоти обертів лопастей. В даний час набувають великого поширення ВЕС без аеродинамічного регулювання, які в максимально використовують енергію вітру в робочому діапазоні його швидкостей. Частота обертання вітрогенератора, при цьому, змінюється в більшому діапазоні, що накладає відповідні вимоги щодо міцності елементів

конструкції вітродвигуна і генератора. Коефіцієнт використання енергії вітру і сумарний коефіцієнт корисної дії вітроагрегата в цьому випадку максимальні. Розрахунки, підтвержені практичними результатами, показують, що робота ВЕС зі змінною частотою обертання дозволяє виробляти на 20-30% електроенергії більше, ніж при роботі з аеродинамічною стабілізацією обертів вітродвигуна [66].

Основним недоліком будь-якої вітрової електричної станції є нестабільність генерації енергії, яка зумовлена ймовірнісною природою швидкості вітру. Для підвищення автономності таких систем використовують енергоакumuлюючий елемент, як буфер, який дає змогу акумулювати електричну енергію в періоди високої швидкості вітру, та використати отримані резерви в періоди низької швидкості вітру, що надає ознаки комплексної генерації електроенергії. Цим забезпечується надійність систем електропостачання та підвищується ефективність (мінімізація недовиробітку електроенергії при збереженні максимальної ефективності кожної ВЕУ) роботи ВЕС в цілому.

Ємність енергоакumuлюючого елемента повинна бути обґрунтована, оскільки вона залежить від кількості, типу, потужності, робочих швидкостей кожної ВЕУ вітрової електричної станції та передбачуваних графіків енергоспоживання.

Одним з основних факторів, що обмежують можливості більш широкого практичного застосування автономних вітроелектростанцій (ВЕС), є відносно висока вартість електроенергії. Цьому сприяють загальнотехнічні закономірності, що зв'язують питомі потужності і техніко-економічні характеристики енергоустановок. Економічна ефективність малих ВЕС, які працюють на ізолюваного споживача, поки не вийшла на такий же високий рівень. це відставання пояснюється в основному двома причинами: необхідністю в пристроях акумулювання енергії і нерівномірністю графіка навантаження споживача. Тому, проблема підвищення енергоефективності автономних вітроустановок має першочергове значення для практичного застосування ВЕС в децентралізованих зонах.

Одним з актуальних напрямків здешевлення електроенергії ВЕС, поряд зі зниженням вартості обладнання станції, є забезпечення максимально можливого використання можливостей генерації електроенергії, що відповідає енергії первинного енергоносія - вітру. В існуючих вітроелектростанціях, через невідповідність графіків навантаження станції та енергії вітру, не вдається використати весь енергетичний потенціал.

Одним із способів утилізації «надмірної» на даний момент часу електроенергії ВЕС є використання електричних акумуляторних батарей. Акумуляторна батарея автономної ВЕС є по суті буфером накопичення електричної енергії, що генерується станцією, і елементом, що узгоджує миттєву потужність навантаження і вітрогенератора. Характерною особливістю акумуляторних батарей є їх здатність віддавати значний струм розряду при обмеженій зарядній потужності. Отже, акумуляторна батарея може забезпечити покриття пікового навантаження станції, але не здатна, при відповідних режимах, акумулювати всю електроенергію вітрогенератора, невикористану в даний момент часу.

Акумуляторна батарея характеризується можливістю віддавати споживачу значну потужність, однак запасати електроенергію вона здатна тільки на рівні потужності, яка визначається величиною зарядного струму. Отже, надлишок потужності вітрогенератора над рівнем споживання навантаженням і акумуляторною батареєю в більшості випадків не може використовуватися корисно. “Зайва” потужність зумовлює збільшення частоти обертання вітродвигуна при зниженні коефіцієнта корисної дії енергоустановки. Структурна схема ВЕС з регульованою ємністю акумуляторних батарей подана на рисунку 1.3.

Можливості використання енергоакumuлюючого елемента в структуру вітрової електростанції на прикладі автономних ВЕС досліджено та обґрунтовано в працях таких науковців, як Лукутин Б.В., Лукутин О.Б., Шандарова Е.Б., Суржикова О. А., Жарков С. В [66, 67, 73, 112, 113, 115], алгоритми роботи вітрових електричних станцій з використанням енергоакumuлюючих елементів описано в роботах таких закордонних науковців, як F.J. Luo, Zhaoyang Dong, Ke Meng,

Peerapon Chanhom, KW Wee, Sharad.W, Yang Zhang, Jean Belanger, Géza Joos, Wei Li, Mesut E. Baran, Sercan Teleke [127, 156, 177, 180, 181, 184, 185].

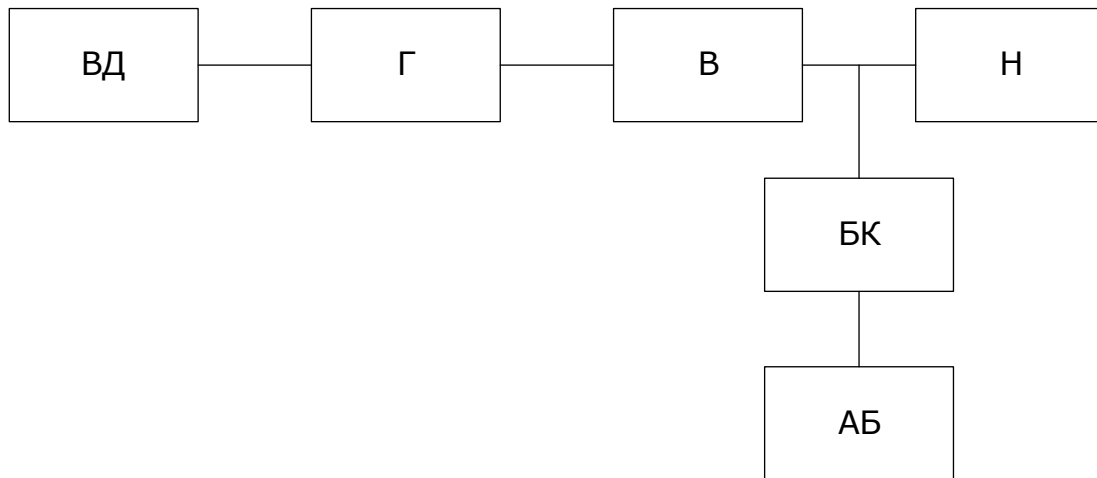


Рисунок – 1.3 Структура вітрової електричної станції з регульованими акумуляторними батареями

На схемі позначені ВД – вітродвигун, Г – генератор вітроелектростанції, В – випрямляч, Н – блок навантаження, БК – блок керування, АБ - блок акумуляторних батарей.

Особливістю даної системи електроживлення є можливість регулювання за допомогою керуючого блоку ємності акумуляторних батарей, що підключаються до генератора ВЕС. Це дає змогу регулювати зарядний струм акумуляторних батарей і, відповідно, утилізувати практично всю потужність вироблену вітродвигуном.

### 1.2.2 Комплексні системи генерації електричної енергії

Використання вітрових електричних станцій разом з централізованою електроенергетичною системою задля вироблення електричної енергії з метою забезпечення графіка навантаження споживачів формує комплексну електричну систему. Крім того, робота вітрової електростанції на електроенергетичну систему полегшує узгодження можливої величини (для даного вітру) генерованої та переданої споживачу енергії. Наявність електроенергетичної системи частково усуває необхідність в пристроях накопичення енергії і резервних енергетичних джерелах, які необхідні для автономних вітроелектростанцій. Разом з тим, додавання акумуляюючого блоку не тільки істотно зменшить втрати електроенергії

виробленої ВЕУ в періоди перевиробітку, а й забезпечить можливість інтелектуалізації управління ВЕС, шляхом оптимального використання акумульованої енергії.

В даному випадку метою використання вітрової електричної станції є зменшення шкідливих викидів в атмосферу результатів роботи теплових електричних станцій, поступове заміщення відновлювальними джерелами енергії традиційних систем енерговироблення.

Сучасні промислові вітрові електричні станції потребують достатньо великих площ, оскільки відстань між вітряками повинна бути не меншою ніж три діаметри вітроколеса, а він може сягати 70-100 метрів. Крім цього необхідно визначити вітровий енергетичний потенціал регіону та провести довгострокове прогнозування задля визначення доцільності розміщення ВЕС та ефективності використання ВЕУ кожного окремого типу. Такі завдання вирішувалися в роботах [71, 162]. Крім того важливими завданнями є здійснення статистичного аналізу швидкості вітру для конкретних географічних координат, з метою визначення енергетичного потенціалу вітру, обґрунтування доцільності використання енергоакумулюючого елемента, та його енергетичної ємності при необхідності його встановлення. Дані завдання можуть бути вирішені розробленням методів статистичного аналізу швидкості вітру з використанням двопараметричних сімейств неперервних розподілів, та прогнозуванням на основі отриманих результатів швидкості вітру в конкретній географічній точці.

### **1.2.3 Методи та засоби оцінювання вітрового енергетичного потенціалу**

Існують різні способи отримання статистичних даних швидкості вітру з різною дискретністю в конкретних географічних координатах. До них відноситься: отримання даних з метеослужб, встановлення портативних метеостанцій в необхідному місці на визначений період часу, отримання інформації з спеціалізованих веб-сервісів.

Статистичні дані швидкості вітру отримані з метеослужб або інших спеціалізованих установ, які знаходяться поблизу необхідної географічних координат мають певні особливості [61]:

- вони є усередненими – метеостанції усереднюють дані за певні проміжки часу, в результаті немає можливості побачити особливості динаміки швидкості вітру в залежності від часу доби.

- Висота заміру – Швидкість вітру може залежати від висоти. Дані, які надає метеослужба, зазвичай знімаються на висоті 10 м.

- Не завжди зрозуміло, як прив'язати показники до потрібної географічної координати, оскільки часто значні розбіжності швидкості вітру можна спостерігати вже на відстані 30-50 м в будь-яку сторону, не кажучи про відстані в два кілометри чи більше. Також необхідно враховувати різницю ландшафту об'єкту і ландшафту місця, де знаходиться метеослужба [57].

Даний спосіб найпоширеніший, оскільки тут можна отримати дані першоджерела.

Іншим способом є замір швидкості вітру в майбутньому місці установки портативної метеостанції. Перевагою такого підходу є висока точність даних. При проведенні робіт з вимірювання швидкості вітру на місці установки, можна встановити давачі на необхідну висоту. Даний спосіб є найбільш об'єктивним і дає найточніші дані швидкості вітру. Недоліками цього способу отримання даних є:

- Тривалість часу заміру. Для проведення об'єктивних замірів, портативна метеостанція повинна встановлюватись на достатньо тривалий термін, бажано не менше календарного місяця. В ідеальному варіанті, показники повинні зніматися протягом цілого календарного року, оскільки в залежності від регіону Актуальністьснує сезонність вітрів (взимку, восени і навесні вітер сильніший). Короткострокові заміри не забезпечують отримання об'єктивних даних.

- Вартість виконання робіт по виміру швидкості вітру портативною метеостанцією є вищою, ніж отримання загальних середньостатистичних даних від місцевих метеослужб.

Проте найбільш зручним, на даний час, є спосіб отримання даних швидкості вітру зі спеціалізованих веб-ресурсів, які надають детальну статистичну інформацію про швидкість та напрямок вітру в будь-якій географічній координаті з різною дискретністю в режимі реального часу. Дані з цих сервісів можна



отримати за допомогою спеціальних API у зручному для подальшого використання форматі: JSON, XML, CSV. Найбільш відомими є weather.com, worldweatheronline.com, ICM, в Україні це rp5.ua, sinoptik.ua, gismeteo.ua. Перевагою використання даного способу є:

- швидкість отримання даних;
- висока точність даних;
- зручний формат результуючого набору даних;
- ціна – дані отримані таким способом є безкоштовними

Використання статистичних даних швидкості вітру дає можливість здійснити їх попереднє опрацювання, здійснити їх детальний статистичний аналіз та застосувати результати при формуванні алгоритмів роботи системи управління вітровою електричною станцією, а також можуть бути використанні при визначенні місця розміщення та типу ВЕУ.

Середньорічне значення швидкості вітру можна отримати з карти вітрів України, яка дає можливість оцінити енергетичний потенціал вітру в конкретних вітрових регіонах України. Карту наведено на рисунку 1.4. [188].



Рисунок – 1.4 Середньорічні значення швидкості вітру на території України

Важливим напрямком дослідницької діяльності в вітроенергетиці є оцінювання вітрового енергетичного потенціалу регіону, а також обґрунтування конкретного місця розташування вітрової електричної станції [58]. Статистичні дані швидкості вітру, отримані одним з наведених способів дають можливість отримати важливі параметри (енергетичний потенціал, швидкість, напрямок) вітру для конкретних географічних координат з певною дискретністю.

Для дослідження енергетичного потенціалу територій використовують також такі показники, як безперервна тривалість робочої швидкості вітру, питома потужність вітру та критерій стабільності функціонування вітроагрегатів [57, 58].

### **1.3 Аналіз режимів систем контролю та управління комплексною генерацією електричної енергії**

Забезпечення ефективності управління в енергетиці пов'язано з її інформатизацією та автоматизацією. Під цим розуміємо використання для керування складними системами досягнень в області інформаційних технологій, які охоплюють відбір, передачу та опрацювання даних, використання алгоритмів з елементами штучного інтелекту. Логічним розвитком систем автоматизації управління енергетичними процесами, оперативно-диспетчерського управління є автоматизовані системи диспетчерського управління (АСДУ), технологічну основу яких складають інформаційно-обчислювані і управляючі комплекси [7].

#### **1.3.1 Автоматизовані системи диспетчерського управління в енергетиці**

Автоматизована система диспетчерського управління (АСДУ) комплекс програмних і технічних засобів, призначений для вироблення та реалізації керувальної дії на технологічний об'єкт керування згідно з прийнятими критеріями керування [79]. Під АСУ ТП зазвичай розуміється комплексне рішення, що забезпечує автоматизацію основних технологічних операцій на виробництві в цілому або якійсь його ділянці, що випускає відносно завершений продукт.

Автоматизована система диспетчерського управління АСДУ являє собою ієрархічно побудовану людино–машинну систему, яка забезпечує збір,

перетворення, передачу, переробку і відображення інформації про стан і режими системи, формування на основі зібраної інформації, передачу і реалізацію керуючих команд з метою виконання системою (за рахунок наявних коштів) функцій надійного і економічного постачання електричної енергії необхідної якості всіх її споживачів [9, 22, 29, 88].

Концепція АСДУ, в рамках якої забезпечено її створення, була розроблена в кінці 60-х - початку 70-х років [88, 37]. Вона постійно вдосконалюється як за рахунок поліпшення методів, використовуваних при вирішенні завдань управління, і інформаційної бази, так і за рахунок поліпшення засобів управління - обчислювальних і керуючих ЕОМ, засобів передачі та відображення інформації, засобів автоматичного регулювання та протиаварійної автоматики і т.д.

Побудова даної системи також є необхідністю для підприємств, що мають територіально рознесені об'єкти технологічного процесу, що підлягають оперативному контролю та управління в реальному часі.

Основними функціями автоматизованої системи диспетчерського управління є:

- збір, архівування та надання персоналу оперативних даних нормального і аварійного режимів;
- забезпечення оперативного дистанційного телеуправління;
- ведення архівів оперативних даних;
- забезпечення доступу до оперативної і ретроспективної інформації керівникам різного рівня;
- взаємодія із суміжними АС;
- діагностика програмно-апаратних засобів системи.

В структурі автоматизованих систем диспетчерського управління виокремлюють дві частини: забезпечуючу і функціональну. Загальну структуру АСДУ подано на рисунку 1.5.

Склад основних частин регламентується Державним стандартом та іншими методичними та керівними матеріалами зі створення автоматизованих систем диспетчерського управління [45].

Функціональну частину становлять функції, які виконує АСДУ, рішення задач планування режиму, оперативного управління і автоматичного управління.



Рисунок – 1.5. Загальна структура автоматизованої системи диспетчерського управління

Забезпечувальна частина АСДУ містить підсистеми для автоматизації розв'язування задач з використанням технічних засобів управління у встановлених режимах функціонування. Як правило, склад забезпечувальної частини АСДУ однаковий для різного типу систем. Це дає можливість забезпечити сумісність функціонування різних систем. Обов'язковими елементами АСДУ є інформаційне, технічне, програмне та математичне забезпечення [20, 45, 76, 95, 97, 107].

Інформаційне забезпечення включає в себе сукупність проектних рішень за розміщенням, розмірами та формами організації інформації, яка використовується

в АСДУ. Воно складається з сукупності класифікаторів, показників, нормативної бази, а також персоналу, який забезпечує своєчасність, надійність та якість технології обробки і зберігання інформації [20].

Технічне забезпечення включає в себе сукупність усіх технічних засобів (технічні засоби збору, реєстрації, передавання, обробки, відображення інформації ін.), які використовуються при функціонуванні АСУ, а також технічна документація, керівні та методичні матеріали та персонал, який обслуговує технічні засоби [107].

Програмне забезпечення містить сукупність програм на носіях і даних, які призначена для налагодження, функціонування й перевірки АСУ. До складу ПЗ входять спеціальні і загальносистемні програми, методичні матеріали та інструкції з використання програмного забезпечення, а також персонал, який займається його розробкою та супроводом протягом життєвого циклу АСУ. До системного ПЗ належать програми, призначені для організації обчислювального процесу та розв'язування основних задач обробки даних. Такі програми забезпечують розширення функціональних можливостей ЕОМ, автоматизацію планування черги, контроль та управління процесом опрацювання даних. Спеціальне програмне забезпечення – це набір програм, які розробляються під вимоги конкретної АСДУ. Містить пакети прикладних програм, які виконують організацію та опрацювання даних при розв'язуванні функціональних задач АСДУ.

Математичне забезпечення містить сукупність математичних моделей, методів та алгоритмів опрацювання інформації, які застосовуються для розв'язування функціональних задач та в процесі автоматизації проектних робіт автоматизованих систем диспетчерського управління. До них відносять методи та засоби розв'язування типових завдань управління, засоби моделювання процесів управління, методи оптимізації управлінських процесів прийняття рішень (методи математичного програмування, теорії масового обслуговування, багатокритеріальної оптимізації, математичної статистики, і т. д.) [45]. Сукупність усіх компонентів автоматизованої системи, за винятком людей, утворює комплекс засобів автоматизації (рисунок 1.6).

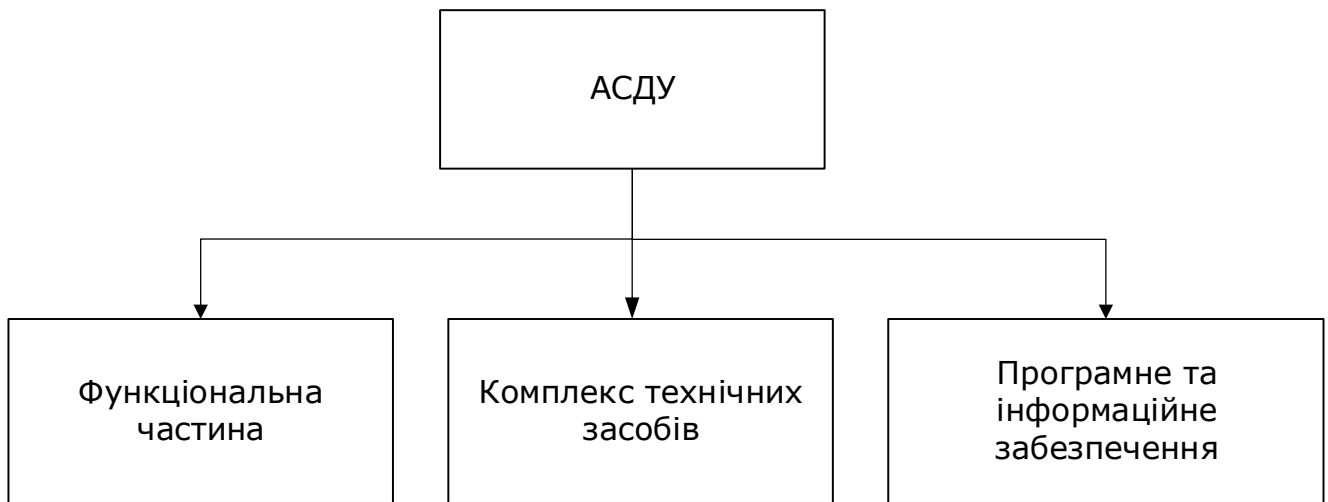


Рисунок – 1.6 Комплекс засобів автоматизації

Сучасні автоматизовані системи диспетчерського управління є трьохрівневими системами управління: це нижній рівень обладнання (Input/Output level), середній рівень управління обладнанням (Control level), та верхній промислового сервера, мережевого обладнання, рівень диспетчерських станцій (рисунок 1.7). На нижньому рівні – рівні датчиків (sensors), вимірювальних пристроїв, а також виконавчих пристроїв (actuators), здійснюється узгодження сигналів датчиків з входами пристрою управління, а також команд, які видаються з виконавчими пристроями. На середньому рівні контролерів (ПЛК-PLC, Programmable Logic Controller) отримується інформація з контрольно-вимірювального обладнання та датчиків про стан технологічного процесу і видаються команди управління, у відповідності до запрограмованого алгоритму управління, на виконавчі механізми.

На верхньому рівні системи здійснюється контроль за ходом виробництва: забезпечується зв'язок з нижніми рівнями, звідки здійснюється збір даних, візуалізація та моніторинг ходу технологічного процесу. Це рівень HMI, SCADA. На цьому рівні задіяний оператор (диспетчер) який здійснює локальний контроль технологічного обладнання через людино-машинний інтерфейс (HMI - Human Machine Interface). До HMI відносяться: монітори, графічні панелі, які встановлюються локально на пультах управління і шафках автоматики. Для здійснення контролю за розподіленою системою машин, механізмів і агрегатів застосовується SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) система. Ця

система являє собою програмне забезпечення, яке налаштовується і встановлюється на диспетчерських комп'ютерах. Вона забезпечує збір, архівацію, візуалізацію, найважливіших даних від контролерів. При отриманні даних система самостійно порівнює їх із заданими значеннями керованих параметрів і при відхиленні повідомляє оператора за допомогою сигналів (Alarms), дозволяючи йому вжити необхідних заходів. При цьому система записує все, що відбувається, включаючи дії оператора, забезпечуючи контроль дій оператора в разі аварії або іншої нештатної ситуації. Таким чином, забезпечується персональна відповідальність керівника оператора.

Програмне забезпечення на базі SCADA-систем дозволяє здійснювати обмін даними різних пристроїв зв'язку з об'єктом управління, здійснювати обробку даних в режимі реального часу, реалізацію SCADA HMI - людино-машинного інтерфейсу з відображенням інформації на ПК або операторських панелях, реалізувати ведення бази даних, здійснювати контроль над аварійною сигналізацією і повідомленнями про тривоги, створювати звіти про хід технологічного процесу та передавати дані на верхні рівні АСУ ТП (MES / ERP системи);

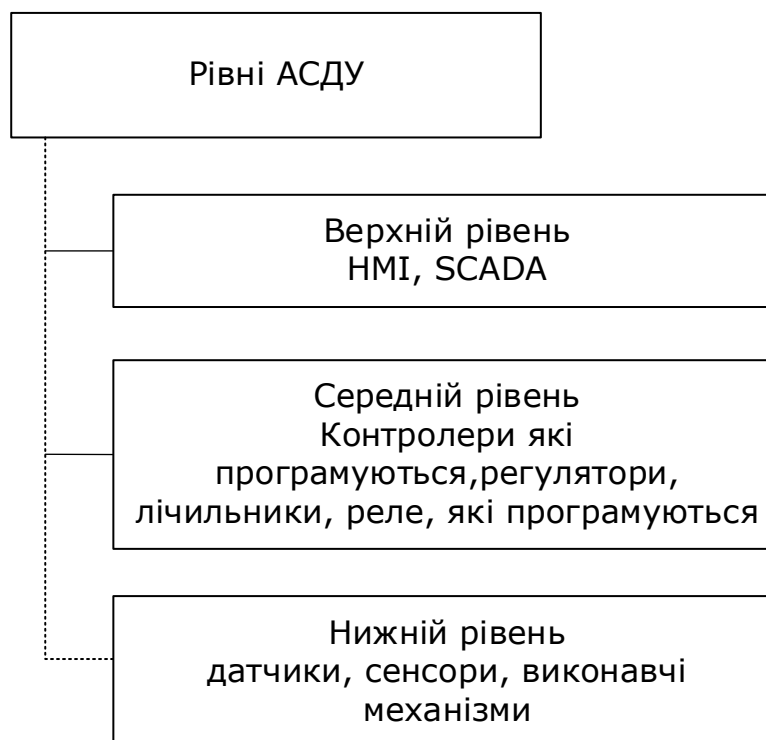


Рисунок – 1.7 Схематичне відображення рівнів автоматизованої системи диспетчерського управління

Аналіз сучасних автоматизованих систем диспетчерського управління в енергетиці, показав, що суттєва кількість АСДУ не обладнані системами підтримки прийняття рішень. Нікуди не поділись проблеми прийняття рішень пов'язані з визначенням диспетчером із запропонованої сукупності конкретної альтернативи при наявності інформації про стан об'єкта та системи управління, критерії [31, 53, 96, 99].

Схематично взаємодію верхнього і нижнього рівнів управління АСДУ подано на рисунку 1.8.

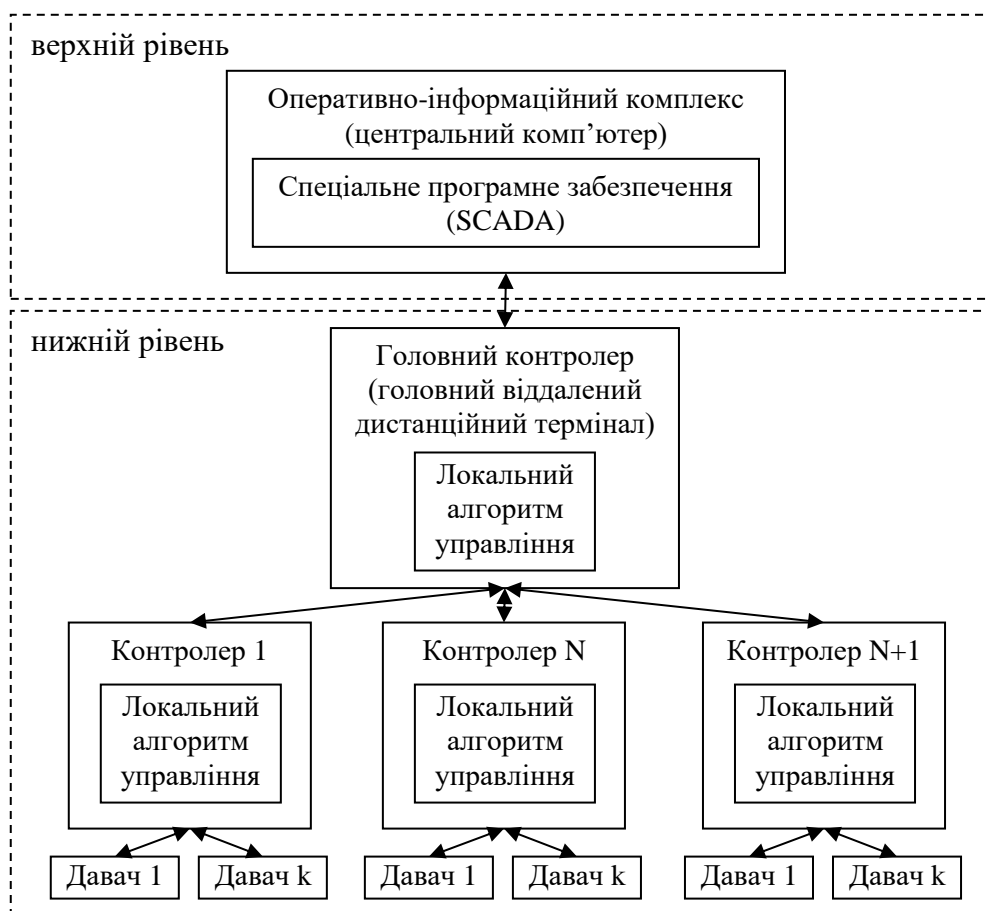


Рисунок – 1.8. Ієрархія автоматизованої системи диспетчерського управління

### 1.3.2 Перспективні завдання в управлінні сучасними вітровими електричними станціями

До недавнього часу, більшість вітрових електричних станцій працювали в режимі максимального виробітку електричної енергії. Відповідно, управління такими ВЕС здійснювалось з врахуванням можливостей, а отже на максимізацію виробітку енергії з залученням всіх наявних ресурсів. Сучасні вимоги щодо режиму



роботи вітрової електричної станції передбачають підвищення ефективності використання енергетичного обладнання шляхом виконання інших регулюючих функцій та вироблення чітко заданої кількості електричної енергії, яка визначається графіком навантаження споживачів. Для підвищення ефективності управління таким режимом актуальними стали нові завдання. Базовим постало завдання визначення активного складу вітрової електростанції з врахуванням динаміки навантаження, потужності вітропарку, швидкості вітру, коефіцієнта ефективності вітрових електроустановок та можливостей засобів акумулювання енергії. Слід додати, що умови ефективного використання різного типу ВЕУ визначаються сукупністю критеріїв ефективності та системами обмежень [72, 74].

Коефіцієнт ефективності вітрової енергоустановки це оцінка стану ВЕУ на основі багатьох параметрів, серед них експерти відзначають: кількість виробленої енергії, технічний стан, кількість включень та виключень, час напрацювання, мінімальну стартову та максимальну робочі швидкості вітру.

### **1.3.3 Аналіз методів визначення активного складу вітрової електричної станції**

Активний склад (використовувані для виробництва енергії) вітрових установок визначає потужність та ефективність вітрової енергетичної системи, але при цьому необхідно враховувати технічні та технологічні впливи процесів комутації ВЕУ

Визначення активного складу вітрової електричної станції дає можливість підвищити економічність та надійність системи. Оскільки графіки навантаження є нерівномірними, а швидкість вітру є ймовірнісною характеристикою, можливі ситуації, коли необхідно переформувати активний склад вітрової електричної станції задля підвищення ефективності використання енергетичного обладнання та задоволення потреб споживачів (навантаження). Основними тригерами для наступного визначення активного складу ВЕС можуть слугувати:

- суттєва зміна швидкості вітру (збільшення чи зменшення). Оскільки зміна швидкості вітру визначає активну потужність вітрових електричних

установок, що впливає на потужність вітрової електричної станції в цілому та коефіцієнт ефективності кожної окремої ВЕУ;

- плановий огляд, ремонт та різного роду поломки окремих елементів вітрових електроустановок, які зумовлюють зупинку окремих ВЕУ та зменшення потужності ВЕС. В даному випадку переформування активного складу вітрової електричної станції, дозволяє залучити до роботи інші наявні вітрові електроустановки та компенсувати недоотриману електричну енергію. Зміна активного складу ВЕС в даному випадку можливе лише при наявності справних, незадіяних ВЕУ в складі;

- суттєва зміна навантаження споживачів. В даному випадку переформування відбувається задля забезпечення потреб споживачів електричної енергії.

Дані завдання вирішуються розв'язком задач багатокритеріальної оптимізації, зокрема задачі пакування рюкзака [72]. При цьому постановку задачі формулюють так, потрібно знайти набір вітрових електричних установок, сумарна потужність яких буде максимально наближена до навантаження, яке необхідно забезпечити, а ефективність вибраного набору (сумарний коефіцієнт ефективності включених ВЕУ) буде максимальна. На даний час існує велика кількість методів розв'язання такої задачі, серед них: метод динамічного програмування, метод повного перебору, метод гілок та границь.

### **Метод повного перебору**

Як і будь яку іншу дискретну задачу, задачу пакування рюкзака можна вирішити, повністю перебравши всі можливі рішення. Припустимо зо в нас є  $N$  предметів, які можна укладати в рюкзак. Потрібно визначити максимальну вартість вантажу, вага якого не перевищує  $W$  [73].

Для кожного предмета існує 2 варіанти: предмет або кладеться в рюкзак, або ні. Тоді перебір всіх можливих варіантів має тимчасову складність  $O(2^N)$ , що дає змогу використовувати його лише для невеликої кількості предметів. Зі збільшенням кількості предметів задача стає нерозв'язною даним методом, за прийнятний час.

Даний метод ефективний для нескладних алгоритмів шифрування та алгоритмів, які використовують ключі довжиною до 64-біт. В інших випадках зазвичай застосовують різні оптимізації повного перебору

На рисунку 1.9 подано дерево перебору для трьох предметів. Кожен лист відповідає деякій підмножині предметів. Після складання дерева необхідно знайти лист з максимальною цінністю серед тих, вага яких не перевищує  $W$  [80].

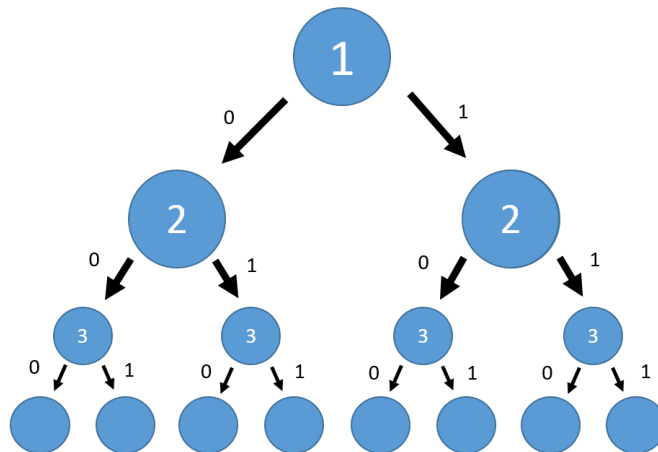


Рисунок – 1.9. Дерево повного перебору для трьох предметів

### Метод гілок та границь

Метод гілок і меж є варіацією методу повного перебору з тією лиш різницею, що ми виключаємо завідомо неоптимальні гілки дерева повного перебору. Як і метод повного перебору, він дозволяє знайти оптимальне рішення і тому відноситься до точних алгоритмів.

Оригінальний алгоритм, запропонований Пітером Колесаром в 1967 році, пропонує впорядкувати предмети по їх питомій вартості (відносно цінності до ваги) і будувати дерево повного перебору. Його покращення полягає в тому, що в процесі побудови дерева, для кожного вузла ми оцінюємо верхню межу цінності рішення, і продовжуємо будувати дерево тільки для вузла з максимальною оцінкою [160]. Коли максимальна верхня межа виявляється в листі дерева, алгоритм закінчує свою роботу.

Під час роботи алгоритму виконується дві основні операції: розбиття вихідної множини на менші підмножини, та знаходження оцінок (згори та знизу).

Оцінка згори – це точка, яка гарантовано не менша, а оцінка знизу —гарантовано не більша за максимум на заданій підмножині. Множина з найбільшою оцінкою зверху називається рекордною [160].

1. На початку вся множина вважається рекордною;
2. рекордна множина розбивається на підмножини;
3. для нових підмножин знайти оцінки згори та знизу;
4. визначити максимальну оцінку знизу серед усіх підмножин;
5. видалити множини у яких оцінка зверху є меншою від максимальної оцінки знизу;
6. знайти максимальну оцінку зверху серед усіх підмножин та вважати її рекордною;
7. якщо необхідна точність або дискретність не досягнута, перейти до пункту 1;

Результатом роботи алгоритму є значення між оцінками згори та знизу для рекордної множини. Точність визначається як різниця між верхньою та нижньою оцінками, тобто для дискретних множин алгоритм завершується коли ці оцінки збігаються [160].

Метод використовується для вирішення деяких NP-повних задач. Швидкодія даного алгоритму залежить від способу визначення оцінок та вигляду функції, але гарантовано не менша за повний перебір.

Здатність методу гілок і меж зменшувати кількість варіантів перебору сильно спирається на вхідні дані. Його доцільно застосовувати лише в тому випадку, коли цінності предметів суттєво відрізняються [26].

### **Метод динамічного програмування**

В основі методу динамічного програмування лежить принцип оптимальності Беллмана: "Яким би не був стан системи перед наступним кроком, потрібно обирати так, щоб виграш на цьому кроці плюс оптимальний виграш на всіх наступних кроках був оптимальним" [17]. Простіше кажучи оптимальне рішення на і-ому кроці знаходиться базуючись на знайдених на попередніх кроках оптимальних рішеннях. Звідси, для того щоб знайти оптимальне рішення на

останньому кроці потрібно спочатку знайти оптимальне рішення для всіх попередніх кроків, починаючи з першого.

Аналіз досліджень методів динамічної оптимізації (таблиця 1.2) показав доцільність використання методу динамічного програмування, тому у роботі за основу обрано саме цей метод. Він забезпечує найкращу швидкість при великих обсягах даних.

**Таблиця 1.2**

Порівняння методів динамічної оптимізації

Метод / Показник	Метод повного перебору	Метод гілок та границь	Метод динамічного програмування
Тип алгоритму	Точний	Точний	Точний
Складність	$O(2^N)$	Залежить від вхідних даних	$O(N \cdot W)$
Переваги		Можливе зменшення часу виконання	- Незалежність від виду вхідних даних - Простота реалізації - Простота розрахунків проміжних результатів - Не потрібне сортування змінних
Недоліки	- Високі часові затрати - Обмежений обсяг даних - Неєфективність на великих обсягах даних	- В випадку коли цінності предметів відрізняються несуттєво, працює як метод повного перебору - Залежність від виду вхідних даних - Потрібне сортування	Великий обсяг використовуваної пам'яті

#### 1.4 Технології управління системою комплексної генерації на базі вітрової електричної станції

Сучасні системи управління вітровими електричними станціями побудовані з на базі промислових контролерів, які призначені для збирання та первинного опрацювання інформації з давачів, що розміщуються на вітрових

електроустановках, та передачі їх на вищий рівень ієрархії в комп'ютеризовані системи. Далі відбувається подальша обробка отриманих даних та представлення їх в інтуїтивно зрозумілому вигляді диспетчеру (це верхній рівень автоматизованої системи управління технологічним процесом). Для реалізації такої архітектури доцільно використовувати рішення, які дозволяють реалізувати зручний інтерфейс зв'язування різних компонентів системи. На основі аналізу сучасних досліджень [30, 76] обґрунтовано застосування технології OLE (Object Linking and Embedding), розробленої компанією Microsoft, для зв'язування та взаємодії між різними програмними застосунками. Технологія OLE в подальшому стала основою архітектури COM (Component Object Model) для роботи з компонентами програмного забезпечення. Використання технології OLE для синтезу та аналізу систем керування передбачає дослідження та застосування технології OPC (Open Platform Communications або Відкрита платформа комунікацій) [30]. Актуальним завданням є дослідження можливості та розроблення методики застосування стандарту OPC при створенні єдиного інтерфейсу для забезпечення ефективної роботи програмного продукту з пристроями або системами різних виробників.

На основі аналізу області застосування OPC–серверів, обґрунтовано можливість застосування протоколу на різних рівнях управління АСУ ТП [35, 54], а саме:

- нижній рівень – рівень польових шин (fieldbus) та окремих контролерів;
- середній рівень – рівень цехових мереж;
- рівень АСУ ТП – рівень роботи SCADA систем;
- рівень АСУП – рівень застосунків управління ресурсами.

Кожен з цих рівнів може обслуговуватися OPC-сервером, поставляючи дані OPC-клієнту на більш високому рівні чи навіть “сусідові” [68].

Важливість застосування OPC з точки зору інтеграції досить прозора і впливає з самої суті OPC – це стандарт на інтерфейс обміну даними з обладнанням [148]. Перша перевага – при заміні якого–небудь компонента, немає потреби коригувати інше програмне забезпечення, оскільки навіть при заміні драйвера, поверх нього працює OPC. Друга перевага полягає в простоті додавання в систему

нових програм, тобто немає необхідності передбачати для них нові драйвери, окрім ,звісно, OPC клієнта.

OPC стандарт розроблено з метою надання розробникам промислових програм універсального фіксованого інтерфейсу для обміну даними з будь-якими пристроями. У той же час розробники пристроїв повинні надавати програму, що реалізує цей інтерфейс (набір функцій). Більшість контролерів які використовуються в промисловості, керуються за допомогою вбудованої операційної системи, тому терміни “контролер” та “вбудована система” в контексті даної роботи мають аналогічне значення.

Аналіз останніх досліджень дає змогу виділити три основні способи взаємодії між вбудованими системами та цільовим програмним забезпеченням компютера [54]:

1) “Одна вбудована система - одна програма”. Кожній вбудованій системі ставиться у відповідність своє унікальне програмне забезпечення, яке в більшості випадків розробляється фірмою–розробником даної системи. Використання даної методики дає змогу досягти оптимальних результатів в швидкості обміну інформацією, а також отримати можливість використання переваг кожної вбудованої системи. З іншої ж сторони, підтримка та оновлення програмного забезпечення для великої кількості вбудованих систем потребує додаткових ресурсів;

2) “Одна вбудована система – багато програм”. При такій взаємодії, кожна система надає відкритий інтерфейс для окремих компаній розробників програмного забезпечення, в результаті чого кожна програма, яка підтримує його, має змогу взаємодіяти з вбудованою системою. В такому випадку, розробка системи спрощується, оскільки створенням програмного забезпечення можуть займатися, як розробники вбудованої системи, так і інші особи.

3) “Багато вбудованих систем – багато програм”. При такому способі взаємодії кожна система має свій програмний інтерфейс, тобто поставляється разом з драйвером, який забезпечує однаковий для всіх вбудованих систем стандартний

інтерфейс (внутрішній програмний інтерфейс ретранслюється на зрозумілий для всіх). Користувацькі системи, надають свій стандартний інтерфейс, таким чином забезпечується взаємодія між вбудованими системами.

Реалізація кожного з наведених методів взаємодії за індивідуальними алгоритмами та інструментарієм, створює деякі труднощі при експлуатації таких систем, тому логічним в даному випадку є застосування стандарту OPC, який використовуючи єдиний програмний інтерфейс, забезпечує доступ програмного продукту до пристроїв та систем різних виробників. Тобто використання даного стандарту забезпечує уніфікацію розроблених засобів для контролерів різних виробників [68].

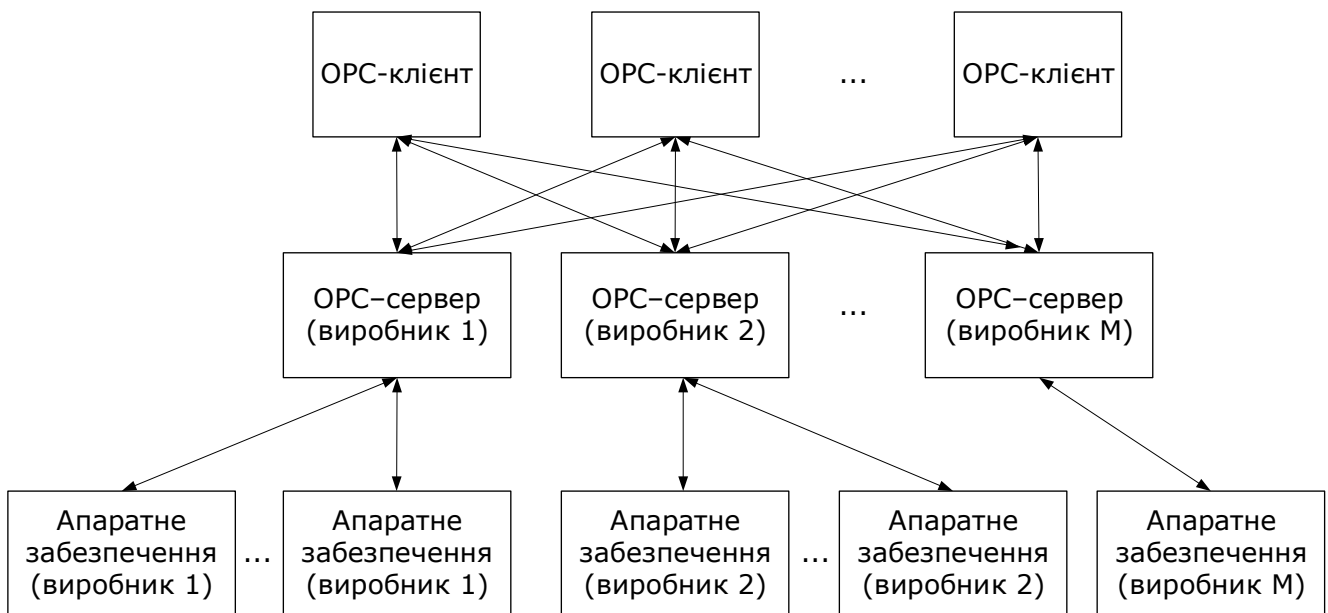


Рисунок – 1.10 Взаємодія апаратури, OPC – серверів і OPC – клієнтів

Технологія OPC включає в себе два класи програм:

1. OPC-сервер, який працює з контролерами апаратури
2. OPC-клієнт, основне призначення якого є отримання та передача на опрацювання даних від OPC-сервера та надсилання йому команд керування.

Для розробки системи підтримки прийняття рішень доцільно використовувати такі елементи стандарту OPC:

- OPC DA (Data Access) – найбільш широко вживаний елемент, використовується для обміну даних в режимі реального часу;



- OPC AE (Alarms and Events) – надає засоби сповіщення про різні події, нештатні ситуації та інформаційні повідомлення;
- OPC HDA (Historical Data Access) – надає доступ до архівних даних;
- OPC DX (Data eXchange) – забезпечує організацію обміну даними між OPC-серверами через мережу Ethernet. Основне застосування даного компонента – створення шлюзів для обміну даними між обладнанням та програмами різних виробників;
- OPC UA (Unified Architecture) – компонент надає кросс-платформенну сумісність.

### **1.5 Обґрунтування актуальності теми і завдань дослідження**

**Актуальність дисертаційної роботи** полягає у тому, що розподіленість елементів ВЕС на значних площах; наявність у їх структурі вітрових установок (ВЕУ) з різними номінальними параметрами; випадковий характер первинного енергетичного потенціалу; різні задачі які виконують елементи ВЕС та інші не дають змоги безпосередньо застосовувати відомі результати для коректного аналітичного розв’язування оптимізаційних завдань щодо формування активного складу вітрової електростанції. Непостійність енергетичного потенціалу вітру зумовлює доцільність комплектації вітрових електричних станцій акумуляторами, які за необхідності, можуть використовуватися як додаткове джерело енергії, а тоді система може набуває ознак комплексної генерації. Складність проектування та експлуатації таких систем визначається особливостями режимів роботи вітрової енергоустановки, розподільчих електричних мереж та стохастичним характером процесів споживання енергії. При цьому виникає ряд нових наукових завдань, які стосуються управління енергодинамічними режимами у складній технічній системі за невизначеності параметрів швидкості вітру, енергетичної ємності акумуляторної батареї, потужності навантаження та ін.

Аналіз сучасних результатів досліджень показує, що для вдосконалення технологічних процесів і їх автоматизації перспективним є інтелектуалізація систем управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції за

наявності засобів акумулювання енергії, шляхом застосування засобів підтримки прийняття рішень.

**Метою досліджень** є інтелектуалізація системи управління енергодинамічними режимами комплексної генерації енергії сучасною ВЕС з використанням засобів підтримки прийняття рішень щодо набору (складу) вітрових агрегатів для підвищення ефективності використання енергетичного обладнання та гарантованого енергозабезпечення споживачів.

**Об'єкт дослідження** – процеси управління енергетичними режимами вітрової електростанції за наявності акумулюючого елемента з урахуванням вимог графіка навантажень та можливостей генерації енергії.

**Предмет дослідження** – методи та засоби інтелектуалізації автоматизованої системи управління (АСУ) енергетичними режимами вітрової електричної станції за наявності засобів акумулювання.

## **Висновки до розділу 1**

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно розв'язати такі завдання:

1. Розробити метод статистичного аналізу швидкості вітру для визначення ймовірнісного діапазону робочих швидкостей вітру, для оцінювання потужності ВЕС.
2. Удосконалити метод визначення активного складу вітрової електричної станції з оптимізацією за параметром відхилення потужності вітропарку від навантаження споживачів.
3. Розробити модель управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції на основі продукційних правил з метою зменшення числа перемикань активного складу ВЕС та забезпечення потреб споживачів в періоди несприятливих погодних умов, за наявності засобів акумулювання енергії.

4. Дослідити вплив енергетичної ємності засобів акумулювання електричної енергії на оптимізацію режимів комплексної генерації електричної енергії.
5. Дослідити залежність кількості перевизначень активного складу вітрової електричної станції від енергетичної ємності енергоакумулюючого елемента.
6. Розробити засоби інтелектуалізації автоматизованої системи управління енергодинамічними режимами вітрових електростанцій.

## **2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГОДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГОАКУМУЛЮЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА**

У даному розділі розроблено модель управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції на основі бази продукційних правил з врахуванням ємності енергоакumuлюючого елемента. Обґрунтовано алгоритми управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції з використанням енергоакumuлюючого елемента. Отримані результати покладено в основу розроблення блоку інтелектуалізації системи управління вітровою електричною станцією, для забезпечення можливості визначення критеріїв ефективності окремих ВЕУ і попереднього опрацювання вхідних даних системи управління з врахуванням технічних параметрів ВЕУ та умов експлуатації.

### **2.1 Інтелектуалізація управління енергоакumuлюючим елементом в структурі вітрової електричної станції**

Ймовірнісний характер параметрів вітру (швидкість, напрямок, енергетичний потенціал) зумовлює ряд динамічних обмежень на використання активної енергії виробленої вітровою електричною станцією [6, 43, 164]. Залежно від швидкості вітру, ВЕС може повністю забезпечувати навантаження споживачів, працювати з виробленням надлишку енергії, чи не забезпечувати необхідного навантаження, навіть працюючи на максимальну потужність (в періоди низької швидкості вітру). Мінімізація впливу зміни швидкості вітру на забезпечення навантаження споживачів, а також підвищення ефективності використання його енергетичного потенціалу є актуальним науковим завданням [59].

Для підвищення енергетичної надійності системи, та підвищення ефективності використання вітрових електроустановок доцільно ввести в систему енергоакumuлюючий елемент, який би дав можливість пом'якшити наслідки перехідних енергодинамічних процесів в періоди критичних погодних умов (в умовах недостатньої або надлишкової швидкості вітру) та навантажень споживачів [59, 122, 137, 149, 182].

Використання акумуляторної батареї (АБ), як додаткового джерела живлення дозволяє підвищити енергетичну автономність вітрової електричної станції, та збільшити частку використання ВЕС в розподільчих мережах [15, 141]. Проте застосування енергоакумуляюючого елемента в складі ВЕС потребує розроблення нових удосконалених методів управління системою в цілому, з врахуванням параметрів енергоакумуляюючого елемента, вітру та навантаження споживачів [120].

### **2.1.1 Розроблення методу управління вітровою електричною станцією за умов невизначеності параметрів режиму.**

Якщо вітрова електрична станція в певний період часу виробляє кількість енергії, яка є більшою ніж навантаження, необхідним є її акумуляування, з метою забезпечення електромагнітної сумісності в мережі. Керуючий блок повинен вчасно реагувати на будь-які істотні зміни, які можуть бути викликані зміною енергетичних потреб чи іншими причинами, які впливають на роботу ВЕС. Так при зменшенні сукупної потужності вітрової електричної станції, коли її недостатньо для забезпечення навантаження споживачів, доцільно використовувати енергію, закумуляовану в батареях, з метою уникнення провалів у графіку електричного навантаження. Використання енергоакумуляюючого елемента в структурі ВЕС дозволить істотно покращити стабільність роботи та забезпечити повне або часткове покриття потреб споживачів в періоди несприятливих умов, технічних несправностей окремих ВЕУ, чи при швидкій зміні потреб споживачів [121, 130, 144, 145, 169]. Система управління (або керуючий блок) повинна також моніторити заряд акумуляторної батареї, не допускати досягнення критичних значень (нижче мінімально допустимого та вище максимально допустимого значення) [59].

Зміна активного складу вітрової електричної станції є складним організаційно-технічним процесом, який вимагає додаткових ресурсів та часу. Енергоакумуляюючий елемент [144] (акумуляторна батарея) забезпечує, як покриття пікових значень навантаження без зміни у складі працюючих вітроустановок, так і збереження технічного стану ВЕУ (зменшення числа

комутацій та шкідливого впливу механічних та електротехнічних перехідних процесів).

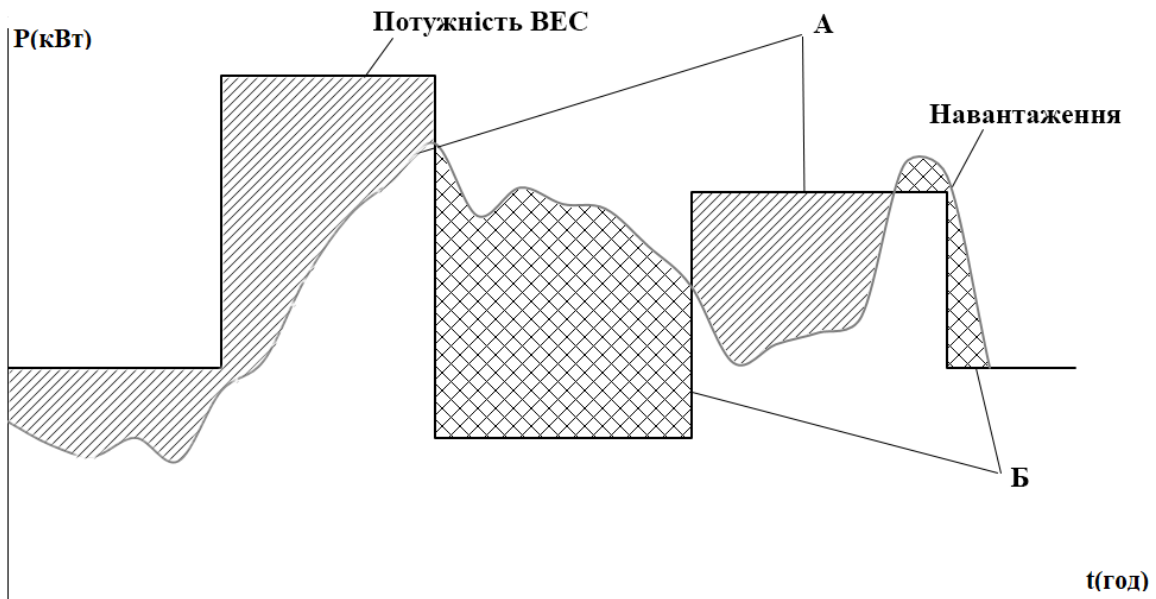


Рисунок – 2.1 Аналіз динаміки роботи енергетичних процесів автономної вітрової електричної станції

На рисунку 2.1 схематично відображено аналіз динаміки процесу вироблення електричної енергії вітровою електричною станцією, залежно від навантаження споживачів.

З метою забезпечення ефективного використання вітрових електричних установок станції, а також збільшення терміну їхньої експлуатації, доцільним є зменшення кількості змін активного складу ВЕС [83, 94] (кількості увімкнень/вимкнень окремих вітрових електроустановок). За таких умов в деякі проміжки часу (дані проміжки часу позначені літерою А), потужність ВЕС може бути більшою ніж навантаження. Проте існують часові інтервали в яких потужність ВЕС не здатна забезпечувати навантаження споживачів (проміжки часу Б). Це може бути зумовлено рядом причин: необхідністю генерувати реактивну енергію, зміною швидкості вітру, виходом з ладу окремих ВЕУ або їх плановим ремонтом, тощо. Тому для ефективного використання виробленої вітровою електричною станцією енергії, зменшення енергетичних втрат, а також мінімізації наслідків незабезпечення навантаження споживачів, доцільно ввести в систему енергоакumuлюючий елемент, який дозволить акумулювати частину енергії в

часових інтервалах, типу А та використовувати її в часові інтервали типу Б. Це забезпечить ефективне використання ресурсів ВЕС, а також потреби споживачів у несприятливі періоди генерації.

З метою забезпечення можливості реалізації описаних сценаріїв, структурна схема ВЕС повинна містити ряд додаткових елементів, необхідність яких досліджено та обґрунтовано у роботах [28, 59, 60, 161]:

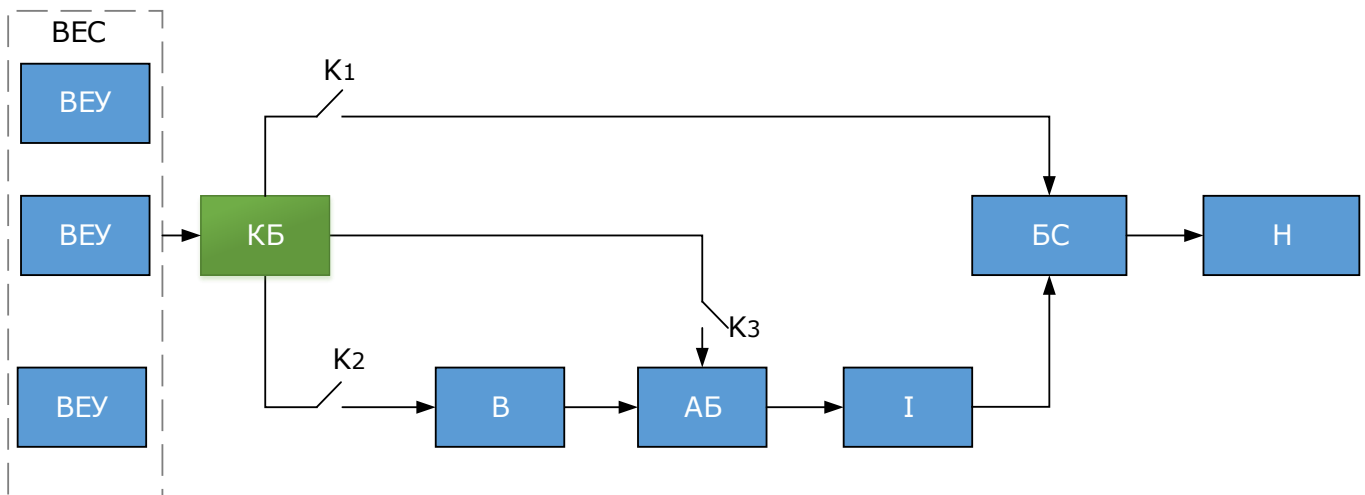


Рисунок – 2.2 Структурна схема вітрової електростанції з використанням акумуляуючого елемента

де КБ – керуючий блок (інтелектуальний блок управління), В – випрямляч, який призначений для перетворення змінного струму в постійний, АБ – акумуляторна батарея, І – інвертор, призначений для перетворення постійного струму в змінний, БС – блок синхронізації, Н – навантаження, К1, К2, К3 – ключі перемикачів режимів.

В даній схемі враховано невизначеності пов'язані з ймовірнісною природою вітру. Керуючий блок (або інтелектуальний блок управління) повинен забезпечувати розподіл енергетичних потоків враховуючи такі параметри: навантаження споживачів, миттєва швидкість вітру, активний склад вітрової електричної станції, номінальна потужність активного складу ВЕС, заряд акумуляторної батареї [135, 151].

Наявність додаткового елемента (акумуляторної батареї) в структурі вітрової електричної станції розширює можливості системи, створює нові зв'язки між компонентами та дозволяє сформулювати та розв'язати такі два завдання:

1. Забезпечення навантаження споживачів в періоди несприятливих погодних умов, рисунку 2.3.

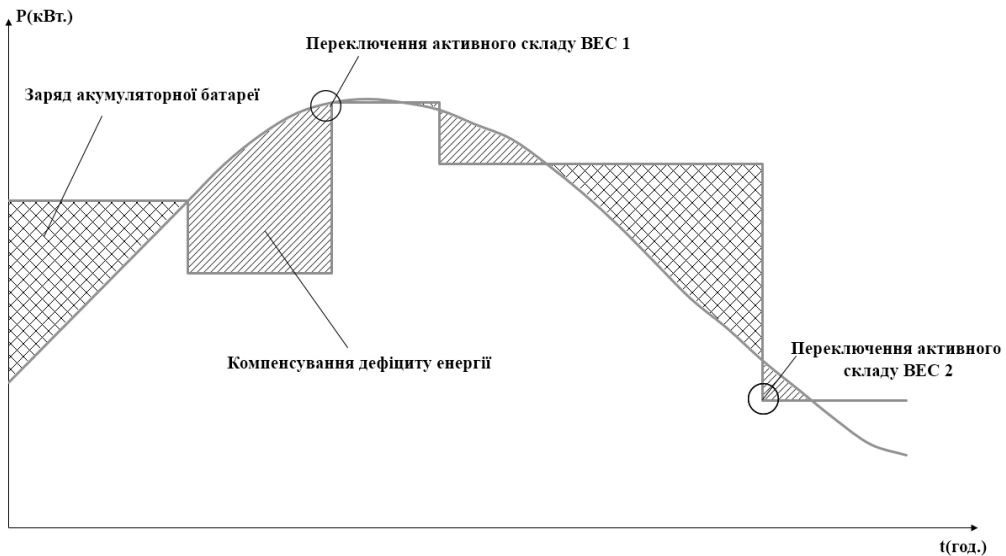


Рисунок – 2.3 Режими генерації ВЕС з використанням акумуляторної батареї для забезпечення вимог графіка електричного навантаження

2. Мінімізація перемикачів складу вітрової електричної станції з метою збільшення періоду експлуатації ВЕС та покращення технічного стану окремих ВЕУ, рисунку 2.4.

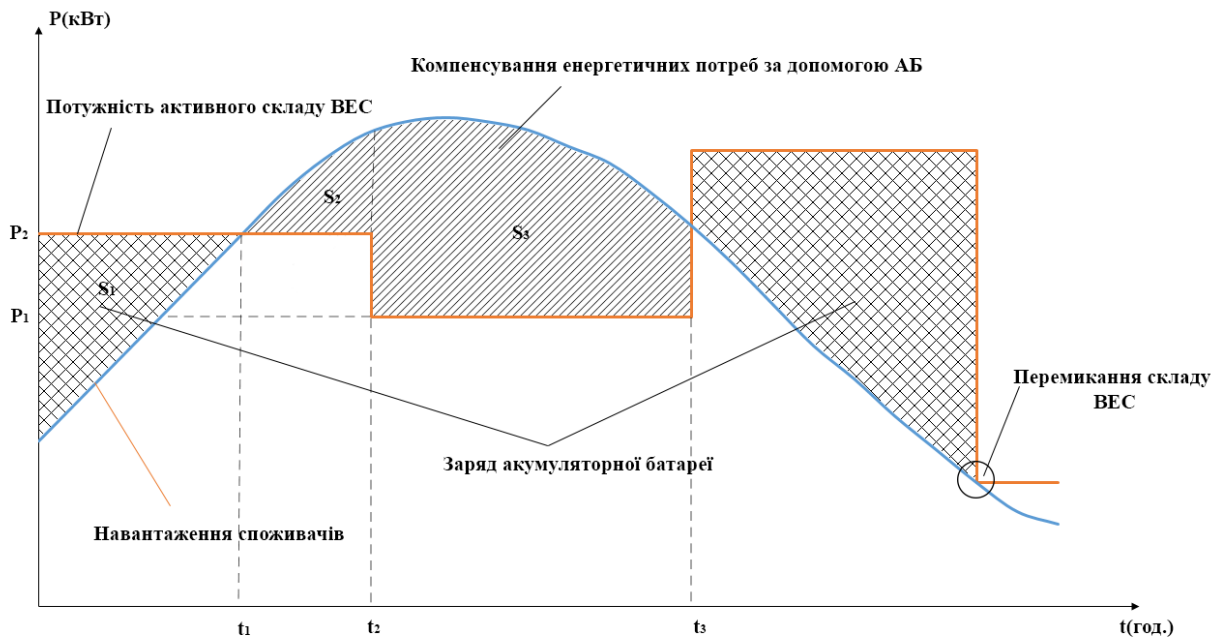


Рисунок – 2.4 Режими генерації ВЕС для мінімізації перевизначень активного складу вітрової електростанції



В узагальненому випадку кількість енергії, яку може прийняти акумулятор в часовому інтервалі  $[t_0, t_1]$  дорівнює площі  $S_1$  та визначається залежністю:

$$P_{зар} = (P_2 - P_0)(t_1 - t_0) - \int_{t_0}^{t_1} f(x)dx \quad (2.1)$$

де  $P_0 = 0$ ,  $t_0 = 0$  – стартові значення потужності та часу,  $P_{зар}$  – енергетична ємність, яку отримає акумуляторна батарея при заряді,  $P_1$  – максимальна отримана кількість енергії на даному часовому інтервалі  $[t_0, t_1]$ ,  $f(x)$  – функція, яка описує графік навантаження.

Енергетична ємність це – енергія, що віддається зарядженим акумулятором при розряді до найменшої допустимої напруги [179].

З рисунку 2.4 видно що на часовому інтервалі  $[t_1, t_3]$  – акумулятор віддає свою енергію, оскільки потужностей вітрової електричної станції в даний інтервал часу недостатньо для забезпечення навантаження [59].

$$P_p = S_2 + S_3 = P_{p1} + P_{p2}, \text{ де} \quad (2.2)$$

$$P_{p1} = \int_{t_1}^{t_2} f(x)dx - (P_2 - P_0) \cdot (t_2 - t_1) \quad (2.3)$$

$$P_{p2} = \int_{t_2}^{t_3} f(x)dx - (P_1 - P_0) \cdot (t_3 - t_2) \quad (2.4)$$

де  $P_p$  – енергетична ємність акумуляторної батареї,  $P_{p1}$ ,  $P_{p2}$  – кількість енергії, яку акумуляторна батарея отримала або віддала в проміжки часу  $[t_1, t_2]$  та  $[t_2, t_3]$  відповідно.

В спрощеному випадку, коли можна знехтувати енергетичними втратами від простою акумуляторної батареї, зменшенням корисної ємності акумулятора, і т.д, кількість енергії яку може віддати акумуляторна батарея буде меншою або рівною енергетичній ємності акумулятора, тобто:

$$P_{зар} \leq P_p, S_1 \leq S_2 + S_3 \quad (2.5)$$

### 2.1.2 Розроблення бази продукційних правил управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції.

Використання енергоакумулюючого елемента в складі вітрової електричної станції суттєво ускладнює алгоритм роботи керуючого блоку (інтелектуального блоку управління), оскільки розподілення потоків енергії системи може відбуватися одночасно між вітровою електричною станцією, навантаженням та енергоакумулюючим елементом.

Інтелектуальний блок управління (керуючий блок) складається з трьох основних модулів (компонентів): модуль вхідних даних, модуль опрацювання даних, модуль візуалізації результатів

Структурна схема інтелектуального блоку управління вітровою електричною станцією наведена на рисунку 2.5:

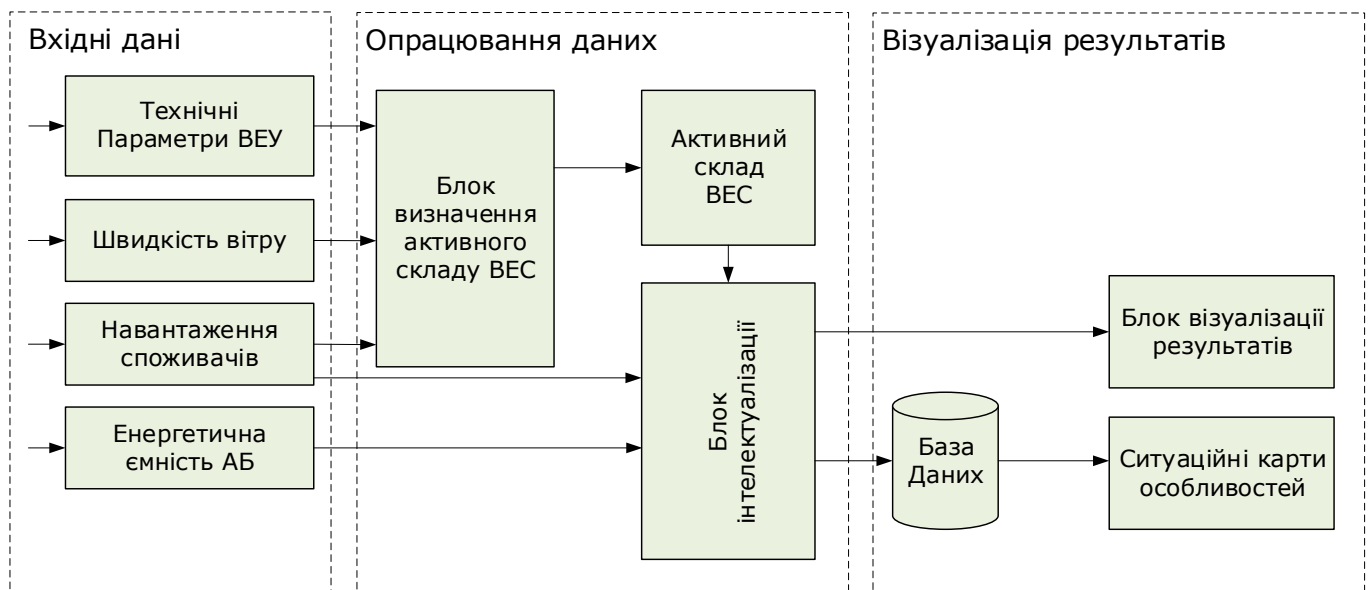


Рисунок – 2.5 Структурна схема інтелектуального блоку управління вітровою електричною станцією з використанням акумулюючого елемента в складі

Модуль вхідних даних, забезпечує отримання та попереднє опрацювання вхідних значень, а саме швидкості вітру та енергетичної ємності енергоакумулюючого елемента, які отримуються з датчиків, а також технічних параметрів ВЕУ та значення навантаження споживачів, які задаються диспетчером.

Модуль опрацювання даних забезпечує визначення набору вітрових електричних установок, які необхідно увімкнути (активний склад) в даний момент та використовує інтелектуальну систему побудовану на продукційних правилах [4, 23, 104, 163], для формування інформаційних порад диспетчеру, щодо управління перетоками енергії, для забезпечення навантаження споживачів, ефективного використання енергоакумулюючого елемента та ефективного функціонування вітрової електричної станції.

Модуль візуалізації забезпечує відображення отриманих результатів у інтуїтивно зрозумілому вигляді та забезпечує побудову ситуаційних карт особливостей, які надають можливість моніторингу стану системи в режимі реального часу.

В результаті, розроблено базу продукційних правил, які дають можливість ефективно управляти наявними можливостями станції задля забезпечення максимальної ефективності [44, 123]. Для реалізації моделі управління енергетичними потоками вітрової електричної станції необхідно реалізувати таку послідовність кроків [59]:

1. Визначити момент перемикання активного складу вітрової електричної станції.
2. Отримати значення навантаження  $P_n$  вітрової електричної станції, значення енергетичної ємності акумуляторної батареї  $Q_i$  в момент часу  $t_i$  на інтервалі часу  $[0;t]$ .
3. Визначити активний склад ВЕС, потужність вибраного набору  $P_i$  в момент часу  $t_i$  на інтервалі часу  $[0;t]$
4. Далі здійснюється верифікація відповідності одному з визначених продукційних правил, та виконання послідовності дій вказаних в даному правилі:
  - 4.1 Якщо потужність  $P_i$  в момент часу  $t_i$ ,  $P_i \geq P_n$ ,  $P_i > 0$ , а  $Q_i = Q_{\max}$ , де  $P_n$  – навантаження споживачів,  $Q_i$  – енергетична ємність акумуляторної батареї в момент часу  $t_i$ , а  $Q_{\max}$  – максимально допустиме значення енергетичної ємності

акумуляторної батареї, тоді керуючий блок вмикає живлення лише навантаження споживачів.

4.2 Якщо потужність  $P_i$  в момент часу  $t_i$ ,  $P_i > P_n$ ,  $P_n > 0$  а  $0 \leq Q_i < Q_{\max}$ , тоді керуючий блок вмикає живлення навантаження споживачів та заряд акумуляторної батареї, при цьому більш пріоритетним є забезпечення навантаження споживачів.

4.3 Якщо потужність  $P_i$  в момент часу  $t_i$ ,  $P_i > P_n$ ,  $P_n = 0$ , а  $0 \leq Q_i < Q_{\max}$ , тоді керуючий блок вмикає лише живлення акумуляторної батареї, при цьому, якщо  $P_i > Q_i$ , енергія  $P_i - Q_i$  залишається незадіяною.

4.4 Якщо потужність  $P_i$  в момент часу  $t_i$ ,  $P_i < P_n$ ,  $P_i > 0$ ,  $0 < Q_i \leq Q_{\max}$ , тоді керуючий блок вмикає живлення навантаження споживачів засобами ВЕС та від акумуляторної батареї.

4.5 Якщо потужність  $P_i$  в момент часу  $t_i$ ,  $P_i < P_n$ ,  $P_i > 0$ ,  $Q_i = 0$ , тоді керуючий блок вмикає живлення навантаження споживачів лише засобами ВЕС.

4.6 Якщо потужність  $P_i$  в момент часу  $t_i$ ,  $P_i < P_n$ ,  $P_i = 0$ ,  $0 < Q_i \leq Q_{\max}$ , тоді керуючий блок вмикає живлення навантаження споживачів від акумуляторної батареї. При цьому, якщо  $Q_i \geq P_n$ , навантаження споживачів забезпечується в повному обсязі, а у випадку коли  $Q_i < P_n$ , до повного розряду (коли  $Q_i = 0$ ).

4.7 Якщо потужність  $P_i$  в момент часу  $t_i$ ,  $P_i = 0$ ,  $P_n > 0$ , а акумуляторна батарея повністю розряджена, тобто енергетична ємність рівна нулю,  $Q_i = 0$ , тоді керуючий блок сигналізує про неможливість ВЕС забезпечити навантаження споживачів в жодному обсязі. Причиною можуть бути різного роду несправності ВЕС, що спричиняють зупинку роботи станції, недостатньо висока швидкість вітру, для включення ВЕУ в роботу, або ж навпаки надвисока швидкість вітру, яка спричиняє автоматичне блокування лопастей ВЕУ.

4.8 Якщо потужність  $P_i$  в момент часу  $t_i$ ,  $P_i = P_n = 0$ ,  $Q_i \geq 0$ , тоді керуючий блок не видає жодних повідомлень.

Завдання обґрунтування оптимальної ємності енергоакumuлюючого елемента є надзвичайно важливим [143]. Вирішення даного завдання полягає в

розроблені методи статистичного аналізу даних швидкості вітру в конкретній географічній координаті (місці встановлення окремих ВЕУ) за тривалий період часу, здійсненні на основі результатів статистичного опрацювання прогнозу швидкості вітру [178], а також прогнозуванні потужності вітрової електроустановки. Це дасть змогу здійснити оцінку ефективності використання окремих ВЕУ, та на основі прогнозу визначити відносний показник кількості електричної енергії, яку необхідно буде акумулювати, щоб забезпечити потреби споживачів, а також зменшити кількість механічних переключень активного складу вітрової електричної станції. Використання даної методики дасть змогу обґрунтувати ефективну енергетичну ємність енергоакумулюючого елемента та, може бути використана при обґрунтуванні місця розташування окремих вітрових електроустановок.

## **2.2 Моделювання енергетичного потенціалу вітрової електричної станції**

Оскільки швидкість вітру неперервно змінюється в часі, на основі попереднього аналізу статистичних даних за період в один рік, встановлено, що залежність густини розподілу значень швидкості вітру може приймати вигляд експоненти чи асиметричної кривої. На підставі аналізу відомих законів розподілу випадкових величин [136], обґрунтовано застосування двопараметричних сімейств абсолютно неперервних розподілів, а саме: розподілу Вейбула, гама розподілу та логнормального розподілу, які залежно від параметра форми, перетворюються в показниковий закон, закон Релея чи у нормальний закон розподілу випадкових величин [58].

Опрацювання статистичних даних швидкості вітру за конкретний період часу дає можливість з потрібною точністю описати розподіл густини ймовірності частоти повторюваності швидкості вітру за допомогою диференціального розподілу та двопараметричних сімейств абсолютно неперервних розподілів таких як розподіл Вейбула, логнормальний розподіл та гама розподіл [58, 165, 166].

Використання функцій густини розподілів дає змогу більш точно оцінити тривалість робочої швидкості вітру, ймовірність появи заданої швидкості вітру та очікувану потужність вітрового потоку.

Статистичний аналіз значень швидкості вітру за допомогою диференціального розподілу полягає в математичному опрацюванні експериментальної вибірки.

### Гамма розподіл

Густина розподілу випадкової величини для гама розподілу з параметрами  $\alpha$  та  $\lambda$  має вигляд [78, 134, 136]:

$$f(v) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} v^{\alpha-1} e^{-\lambda v} \quad (2.6)$$

де  $\Gamma(\alpha)$  – гама функція, коефіцієнти розподілу  $\alpha$  та  $\lambda$ , визначаються за допомогою першого та другого моментів,  $v$  – біжуче значення швидкості вітру

$$M'_v(t) = \frac{\alpha \lambda^\alpha}{(\lambda - t)^{\alpha+1}} \Rightarrow m_1 = M'_v(0) = \frac{\alpha}{\lambda} \quad (2.7)$$

$$M''_v(t) = \frac{\alpha(\alpha+1)\lambda^\alpha}{(\lambda - t)^{\alpha+2}} \Rightarrow m_1 = M''_v(0) = \frac{\alpha(\alpha+1)}{\lambda^2} \Rightarrow \mu_2 = \frac{\alpha(\alpha+1)}{\lambda^2} - \frac{\alpha^2}{\lambda^2} = \frac{\alpha}{\lambda} \quad (2.8)$$

Перший момент  $m_1$  дорівнює математичному сподіванню випадкової величини і показує відносне розташування розподілу на числовій прямій (2.9):

$$m_1 = M = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (2.9)$$

де  $n$  – кількість вимірювань

Другий момент  $\mu_2$  дорівнює дисперсії розподілу випадкової величини і показує розкид розподілу довкола середнього значення (2.10):

$$\mu_2 = \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n} - \left( \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \right)^2 \quad (2.10)$$

Звідси  $\alpha = \frac{M^2}{\sigma}$ , де  $M$  – математичне сподівання випадкової величини, а  $\sigma$  – дисперсія випадкової величини,  $\lambda = \frac{M}{\sigma}$

### Розподіл Вейбула

Функція розподілу Вейбула має вигляд [136, 134]:

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], \text{ для } 1 < k < 10 \quad (2.11)$$

де  $p(v)$  – густина ймовірності повторення швидкості зі значенням  $v$ ;

$c$  – параметр масштабування розподілу Вейбула, визначається залежністю:

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}, \quad (2.12)$$

де  $\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$  – гамма функція;

$\bar{v}$  – середнє значення швидкості вітру, визначається формулою:

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (2.13)$$

де  $v_i$  – значення швидкості вітру  $i$ -го вимірювання, отримане з результатів метрологічних спостережень за певний період часу (м/с);  $n$  – загальна кількість спостережень;  $k$ - коефіцієнт форми для розподілу Вейбула, характеризує асиметрію кривої та визначається за формулою (2.14):

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (2.14)$$

де  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення швидкості вітру, визначається як:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n} - \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}\right)^2} \quad (2.15)$$

## Логнормальний розподіл

Густина розподілу випадкової величини для логнормального розподілу має вигляд [9,11]

$$f(v) = \frac{1}{\beta v \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln v - \alpha)^2}{2\beta^2}\right], \quad (2.16)$$

де  $\alpha, \beta$  – параметри розподілу та визначаються, як:

$$\beta = \sqrt{\ln(V^2 + 1)}; \quad (2.17)$$

$$\alpha = \ln(M) - \beta^2 / 2 \quad (2.18)$$

$M$  – матсподівання вибірки, або ж середнє значення вибірки  $M = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}$  [15]

$V$  – коефіцієнт варіації вибірки, який визначається як:  $V = \frac{\sqrt{\sigma}}{M}$ .

За допомогою карти вітрів території України, для порівняння результатів статистичного аналізу параметрів вітру з використанням різних законів розподілу, визначено місцевості з високим вітроенергетичним потенціалом [14, 15, 21, 49]. Виконано статистичний аналіз результатів замірів швидкості вітру на основі даних з метеостанцій м. Івано-Франківська, м. Асканії-Нової та м. Дрогобича, в період з 1 січня по 31 грудня 2015 року. Заміри здійснювалися щоденно з 2:00 до 23:00 кожні три години, на висоті 10–12 метрів [5, 50].

Ймовірність кожного конкретного значення швидкості вітру визначено за диференціальним розподілом, розподілом Вейбула, Гамма розподілом та Логнормальним розподілом. Для коректної роботи кожного з алгоритмів було виконано нормування значень швидкості вітру до діапазону [10; 15]

При дослідженні повторюваності швидкості вітру, необхідно відзначити, важливість, з енергетичної точки зору, визначення її питомої потужності. Питома потужність вітрового потоку, одиничного перерізу, обчислюється залежністю:

$$P_v = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot v^3 \quad (2.19)$$



В таблиці 2.1 наведено результати математичного опрацювання експериментальних даних для міста Асканія-Нова. Аналогічні результати для до міст Дрогобич та Івано-Франківськ (наведені в Додатку Б, таблиці Б.1, Б.2) [58]. В таблиці:  $v$  – значення швидкості вітру з інтервалом  $\Delta v$ ,  $dN/dv$  – густина функції розподілу швидкості вітру,  $\Phi_v$  – ймовірний диференціальний розподіл швидкості вітру,  $\Phi_{v>v'}$  – інтегральна повторюваність швидкості вітру,  $P_v$  – питома потужність швидкості вітру (при  $\rho = 1,3 \text{ кг/м}^3$ ),  $P_v \cdot \Phi_v$  – функція розподілу енергії вітру,  $P$  – функція ймовірного розподілу швидкості вітру (логнормального, Вейбула, Гама).

**Таблиця 2.1**

Результати статистичного аналізу швидкості вітру для м. Асканія-Нова

$v$ (м/с )	$dN/dv$	$\Phi_v$	$\Phi_{v>v'}$	$P_v$	$P_v \cdot \Phi_v$	Вейбула	Логнормальний	Гамма
1	118	0,0418	1,0000	0,65	0,0272	0,0651	0,0111	0,0442
2	347	0,1229	0,9582	5,20	0,6390	0,1201	0,1288	0,1309
3	565	0,2001	0,8353	17,55	3,5112	0,1534	0,2140	0,1788
4	489	0,1732	0,6353	41,60	7,2034	0,1616	0,2026	0,1780
5	432	0,1530	0,4621	81,25	12,4292	0,1481	0,1531	0,1490
6	283	0,1002	0,3091	140,40	14,0698	0,1210	0,1044	0,1118
7	211	0,0747	0,2089	222,95	16,6581	0,0892	0,0678	0,0777
8	131	0,0464	0,1342	332,80	15,4380	0,0598	0,0430	0,0511
9	94	0,0333	0,0878	473,85	15,7726	0,0366	0,0271	0,0322
10	69	0,0244	0,0545	650,00	15,8817	0,0206	0,0171	0,0197
11	42	0,0149	0,0301	865,15	12,8670	0,0106	0,0108	0,0117
12	18	0,0064	0,0152	1123,2	7,1592	0,0050	0,0069	0,0068
13	19	0,0067	0,0089	1428,1	9,6080	0,0022	0,0044	0,0039
14	5	0,0018	0,0021	1783,6	3,1579	0,0009	0,0029	0,0022
15	1	0,0004	0,0004	2193,8	0,7768	0,0003	0,0019	0,0012

На рисунку 2.6 наведено розподіл ймовірностей повторення кожного конкретного значення швидкості вітру за диференціальним розподілом, розподілом Вейбула, логнормальним розподілом та гамма розподілом для міста Асканія-Нова. Аналогічні залежності побудовано для міст Дрогобич та Івано-Франківськ наведено в Додатку Б (рисунки Б.1 - Б.4) [58].

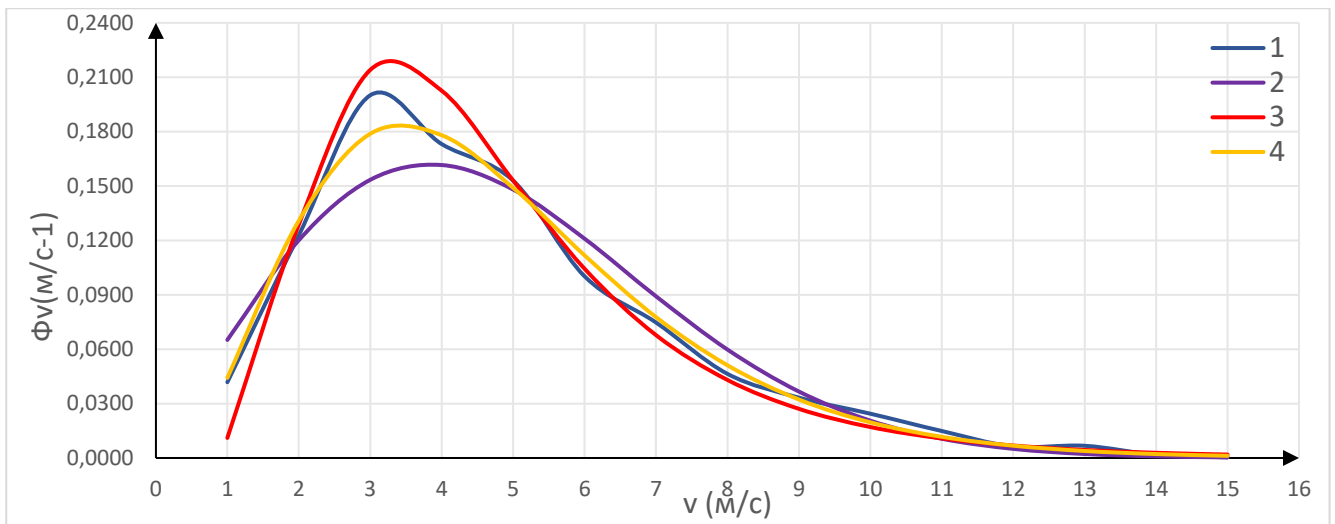


Рисунок – 2.6 Розподіл повторюваності швидкості вітру (м. Асканія-Нова): 1 – диференціальний розподіл, 2 – розподіл Вейбула, 3 – логнормальний розподіл, 4 – гамма розподіл

При цьому річна густина функції розподілу енергії вітру для міста Асканія Нова має максимум при значенні швидкості вітру в 7 м/с, як видно з рисунку 2.7, тобто при швидкості вітру що в більш ніж в 2 рази перевищує найбільш вірогідну.

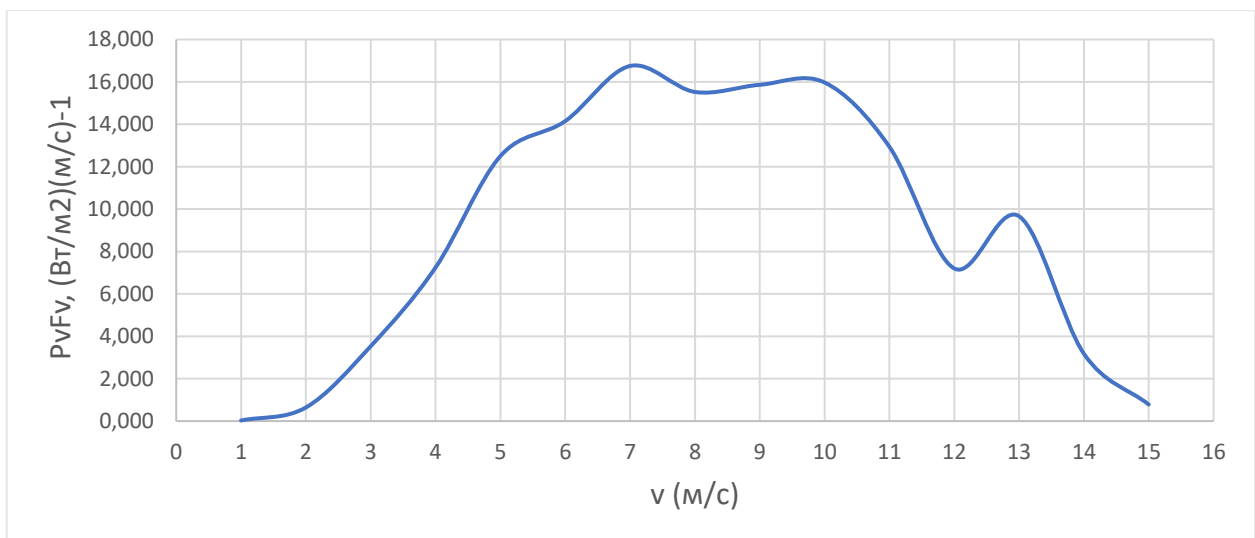


Рисунок – 2.7 Розподіл енергії вітру залежно від його швидкості для міста Асканія Нова

Для визначення адекватності опису вхідної вибірки розраховано коефіцієнти детермінації  $R^2$  для логнормального розподілу, гамма розподілу та розподілу Вейбула після опрацювання архівних даних м. Дрогобич, м. Асканія-Нова та м. Івано-Франківськ наведено в таблиці 2.2.

Коефіцієнт детермінації  $R^2$  визначається за формулою [106]:

$$R^2 = 1 - \frac{D(y|x)}{D(y)} = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2}, \quad (2.20)$$

де  $D(y|x) = \sigma^2$ ; – дисперсія залежної змінної

**Таблиця 2.2**

Коефіцієнт детермінації  $R^2$

Місто \ Розподіл	Вейбула	Логнормальний	Гамма
Дрогобич	0,872	0,794	0,886
Асканія-Нова	0,941	0,965	0,988
Івано-Франківськ	0,788	0,511	0,745

Порівняльний аналіз методів визначення ймовірності повторення швидкості вітру за диференціальним розподілом, розподілом Вейбула, логнормальним розподілом, та гамма розподілом дає змогу обґрунтувати доцільність використання одного з них для визначення ймовірнісного діапазону швидкостей вітру в кожному конкретному вітровому регіоні України. Результати аналізу статистичних даних швидкості вітру за допомогою двохпараметричних сімейств неперервних розподілів дають змогу визначити ймовірність появи кожного конкретного значення швидкості вітру, визначити енергетичний потенціал вітру для кожного значення, а також дозволяють обрахувати екстремуми функції розподілу енергії вітру для досліджуваного інтервалу часу [58]. Отримані дані можуть бути використані при обґрунтуванні:

- параметрів та місця розташування окремих вітроустановок, і вітрових електричних станцій в цілому;
- типу вітрової електричної установки, а саме номінальної потужності, робочих швидкостей вітру, ефективності її застосування
- енергетичної ємності енергоакумуючого елемента з врахуванням, потужності ВЕС, енергетичного потенціалу робочих швидкостей вітру, а також графіка електричного навантаження споживачів.

Окремо слід відзначити важливість отриманих результатів при проектуванні та експлуатації вітрових електричних станцій. Вони забезпечують можливість

формувати алгоритми управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції для ефективного використання, як вітрового енергетичного потенціалу, так і встановлених потужностей, із урахуванням потреб споживачів та можливостей засобів акумулювання електричної енергії [58].

### **2.3 Розроблення методу короткотермінового прогнозування швидкості вітру**

Для підвищення ефективності процесів визначення складу активних вітрових електроустановок необхідно своєчасно реагувати на можливі зміни швидкості вітру в регіоні розміщення вітрової електричної станції. Важливим завданням є короткотермінове прогнозування майбутніх значень швидкості вітру для підвищення ефективності визначення активного складу вітрової електричної станції, шляхом застосування додатково прогнозованих значень на етапі формування складу.

Прогнозування швидкості вітру дає змогу вирішити такі завдання: зменшення кількості перевизначень активного складу ВЕС, яке досягається врахуванням прогнозованого значення швидкості вітру, в сукупності з такими іншими параметрами, як енергетична ємність акумуляторної батареї, майбутні значення навантаження, технічні характеристики ВЕУ, ефективність вітрової електричної станції.

Аналіз останніх досліджень показує, що для прогнозування швидкості вітру доцільно застосовувати методи прогнозування часових рядів [118].

Математичне прогнозування швидкості вітру на основі часових рядів є важливим завданням для ефективного планування та управління багатьма процесами, які при цьому можуть мати складну поведінку, подібну на “хаотичну” [5, 114, 94].

На сучасному рівні розвитку існує велика кількість методів та моделей, які дають змогу побудувати прогноз числових рядів [117, 142, 154]. До найбільш поширених відносяться: регресійні моделі прогнозування, авторегресійні моделі прогнозування (ARIMAX, GARCH, ARDLM), моделі експотенційного згладжування, модель на ланцюгах Маркова, моделі на нейронних мережах, модель

на основі генетичного алгоритму, моделі на основі передатних функцій, модель із вибіркою максимальної схожості, модель на опорних векторах та інші. На сьогодні існує велика кількість успішних рішень, які дають змогу будувати прогноз із застосуванням ймовірнісних методів та суб'єктивних знань експертів [24, 36, 63]. Основними їх недоліком є: недостатня точність прогнозу, залежність результатів від знань та кваліфікації експерта в певній предметній області, суб'єктивізм при розробці математичної моделі та структури, та труднощі з реалізацією таких моделей. Саме тому, задля отримання адекватного рішення при прогнозуванні часових рядів, доцільно використовувати математичні моделі засновані на використанні штучних нейронних мереж (ШНМ) [81, 89, 98, 119, 168].

Штучна нейронна мережа являє собою набір нейронів, які з'єднані між собою. Як правило, функції активації всіх нейронів в мережі фіксовані, а ваги є параметрами мережі та можуть змінюватися. Подаючи на вхід будь-які значення, на виході мережі ми отримуємо результуючий набір чисел. Таким чином, робота нейромережі полягає в перетворенні вхідного вектора  $X$ , в вихідний вектор  $Y$ , причому це перетворення задається за допомогою ваг мережі.

На практиці, майже кожен задачу можна звести до задачі, яка може бути вирішена за допомогою нейронної мережі. Побудова нейронної мережі включає в себе два етапи: вибір типу (архітектури) мережі, та підбір ваг нейронів, тобто навчання нейронної мережі [150].

Конкретний вид перетворення в нейронній мережі, зумовлюється не лише характеристиками нейроподібних елементів (функціями активації тощо), а й безпосередньо залежить від її архітектури.

На першому етапі необхідно обрати нейрони, які будуть використанні в мережі (необхідно врахувати кількість входів, функції активації), яким чином вони будуть з'єднані між собою, а також що повинно бути входом та виходом нейромережі. Залежно від функцій, які виконують нейрони в мережі, їх можна поділити на три типи: вхідні, вихідні та проміжні.

На другому етапі необхідно здійснити навчання обраної мережі, для цього необхідно скорегувати значення ваг таким чином, щоб мережа видавала необхідні

результати. Для багатьох архітектур розроблені спеціальні алгоритми навчання, що дозволяють налаштувати ваги мережі певним чином [81]. Найбільш популярний з цих алгоритмів метод зворотного поширення похибки (Error Back Propagation).

Розглянемо чотири основні різновиди архітектури штучних нейронних мереж:

- одношарові однонаправлені мережі – такі мережі містять шар вхідних та шар вихідних нейронів. Таким чином при такій архітектурі нейрони вхідного шару просто ретранслюють сигнали на вихідний шар, не перетворюючи їх. У вихідному шарі відбувається перетворення сигналів та формування реакції мережі.

- багатошарові однонаправлені мережі – характеризуються наявністю одного або декількох прихованих шарів, які здійснюють перетворення інформації. Використання прихованих шарів дозволяє ШНМ здійснювати нелінійні перетворення вхід/вихід будь-якої складності, а також витягати з вхідних даних статистичні показники високих порядків.

- рекурентні мережі – цей тип штучних нейронних мереж характеризується наявністю зворотних зв'язків та елементів тимчасової затримки сигналу, які додають нелінійні динамічні властивості. Використовуються для розв'язання задач апроксимації тимчасових послідовностей, класифікації, розпізнавання образів та керування.

- цілком зв'язані мережі – такий тип мереж характеризується наявністю зв'язків між усіма нейронами. Робота цілком зв'язаної нейронної мережі і обмін даними контролюється одним головним нейроном. Цілком зв'язні мережі використовуються для розв'язання задач класифікації та розпізнавання образів.

Для обґрунтування типу мережі при розв'язанні завдання динамічного прогнозування швидкості вітру, в роботі розглянуто такі типи штучних нейронних мереж: мережу Елмана, каскадну нейронну мережу та класичну однонаправлену штучну нейронну мережу зворотного поширення похибки (back propagation network).

## Мережа Елмана

Нейромережа Елмана є одним з видів рекурентних мереж, які отримуються з багатошарового перцептрона, шляхом введення зворотних зв'язків, які йдуть від виходів внутрішніх нейронів [134]. Така структура дає змогу врахувати передісторію процесів, що спостерігаються і накопичувати інформацію для вироблення правильної стратегії управління. Оскільки головною особливістю таких мереж є запам'ятовування послідовностей, їх широко використовують в системах управління рухомими об'єктами.

## Каскадна нейронна мережа

Цей тип нейронних мереж є проміжним між двошаровими ШНМ і багатошаровими ШНМ загального вигляду та заснований на нелінійній рекурентній схемі побудови ШНМ. Каскадна нейронна мережа використовує один з найбільш відомих методів нарощування – метод каскадної кореляції [136]. Процес нарощування відбувається шляхом послідовного додавання наступного нейрона, який формує прихований шар. При кожному додаванні нейрона намагаються зменшити реальну похибку нейронної мережі, шляхом визначення максимального значення кореляції між вихідним сигналом нового нейрона і залишковою частиною похибки, яку необхідно нейтралізувати. Процес нарощування нейронів прихованих шарів представлено на рисунку (2.8):

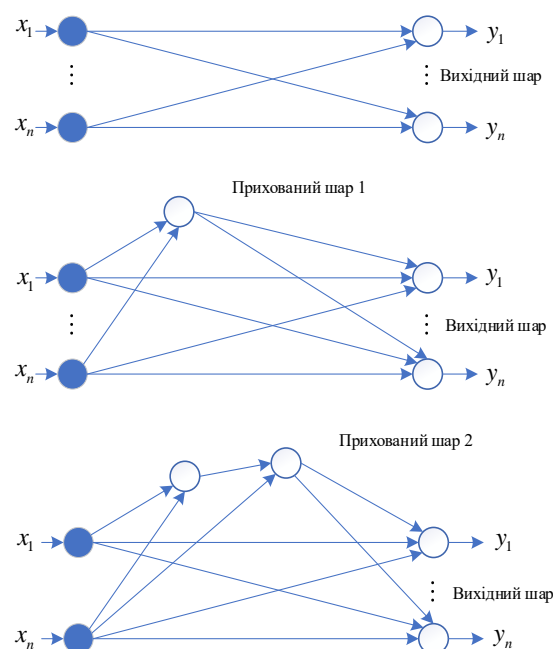


Рисунок – 2.8 Етапи нарощення прихованих шарів штучної нейронної мережі

Процес починається з базової структури, яка містить  $p$  входів та  $d$  виходів та у якій повністю відсутні приховані шари. Додавання кожного нового нейрона відбувається послідовно так, на кожний новий нейрон, якому по замовчуванню присвоюється статус кандидата, подаються всі вхідні сигнали, а також вихідні сигнали всіх попередніх прихованих шарів. При цьому вихід даного нейрона залишається невідключеним. В такому стані починається черговий сеанс навчання, з використанням навчальної вибірки, метою якого є досягнення максимального значення суми:

$$S = \sum_{k=1}^d \left| \sum_{i=1}^N (v^{(i)} - \bar{v})(E_k^{(i)} - \bar{E}_k) \right| \quad (2.21)$$

де  $k$  — поточний вихід нейронної мережі, для якого відбувається визначення похибки;  $i$  — номер поточного елементу навчальної вибірки;  $N$  — кількість елементів навчальної вибірки;  $v^{(i)}$  — поточне значення вихідного сигналу кандидата;  $\bar{v}, \bar{E}_k$  — середні значення виходу кандидата та похибки ШНМ, отримані з на навчальної вибірки.

Для одержання екстремуму визначаються часткові похідні  $\frac{\partial S}{\partial \omega_j}$  для кожного

із входів кандидата:

$$\frac{\partial S}{\partial \omega_j} = \sum_{k=1}^d \sum_{i=1}^N \sigma_k (E_k^{(i)} - \bar{E}_k) \phi'(s^{(i)}) I_j^{(i)} \quad (2.22)$$

де  $\sigma_k$  — знак кореляції між виходом кандидата та виходом ШНМ;  $\phi'(s^{(i)})$  — похідна активаційної функції кандидата від суми входів  $s^{(i)}$ , що сформовані  $i$ -м елементом навчальної вибірки;  $I_j^{(i)}$  — вхідний сигнал, який отримує кандидат від нейрона  $j$ .

Обчисливши  $\left\{ \frac{\partial S}{\partial \omega_j} \right\}_{j=1}^J$ , можна максимізувати  $S$ , використовуючи ознаку

зростання градієнта. Далі значення вагових коефіцієнтів фіксуються на його входах та підключається вихід до входів нейронів. Недоліком методу каскадної кореляції



є занадто швидкий перехід ШНМ до стану зарегульованості, що супроводжується зростанням реальної похибки [78].

### **Однонапрявлена ШНМ зворотного поширення помилки.**

1. На першому кроці ініціалізація ваг малими випадковими значеннями
2. Якщо умова зупинки не виконується необхідно повторити кроки 3-10.
3. Над кожною навчальною парою значень необхідно виконати кроки 4-9.

*Прямий прохід алгоритму:*

4. Кожен вхідний нейрон  $x_i = 1..n$  приймає вхідний сигнал та поширює його на всі нейрони прихованого шару.

5. Кожен нейрон прихованого шару  $v_j = 1..q$  підсумовує свої зважені вхідні сигнали:  $h_j = \sum_i^n w_{ij} x_i$ , застосовує до одержаної суми функцію активації, формуючи, таким чином вихідний сигнал  $v_j = f(h_j)$ ; котрий надсилається до всіх нейронів вихідного шару.

6. Кожен вихідний нейрон  $y_k, k = 1..m$  підсумовує зважені сигнали  $h_k = \sum_j^q w_{jk} v_j$  формуючи після застосування функції активації вихідний сигнал мережі: .

*Зворотне поширення помилки:*

7. Кожен вихідний нейрон зіставляє вихідне значення з необхідною цільовою функцією та розраховує  $\delta_k = (t_k - y_k) f'(h_k)$ , після чого визначається коригуючий член ваг:  $\Delta w_{jk} = \eta \delta_k v_j$  а параметри  $\delta_k$  надсилаються в нейрони прихованого шару.

8. Кожен нейрон прихованого шару  $v_j$  підсумовує свої  $\delta$ -входи від нейронів вихідного шару:  $h_k = \sum_k^m \delta_k w_{jk}$ , результат множать на похідну від функції активації

для визначення  $\delta_j$ ,  $\delta_j = f'(h_j) \sum_k^m \delta_k w_{jk}$  та визначається коригуючий член

$$\Delta w_{jk} = \eta \delta_k w_{jk}$$

**Коригування ваг:**

9. Ваги між прихованим і вихідним шарами модифікуються так:

$$w_{jk}(new) = w_{jk}(old) + \Delta w_{jk} \quad (2.23)$$

Аналогічно корегуються ваги між вхідним та прихованим шарами:

$$w_{ij}(new) = w_{ij}(old) + \Delta w_{ij} \quad (2.24)$$

10. Перевіряється умова зупинки: мінімізація похибки між похибками та реальним виходом мережі.

Наведений аналіз особливостей архітектури та алгоритмів роботи ШНМ забезпечив можливість здійснити комп'ютерні експерименти з прогнозування швидкості вітру

Проведено два типи експериментів, для прогнозування швидкості вітру, з використанням різних часових інтервалів:

1. В першому випадку сформовано тестову вибірку з реальних даних швидкості вітру для міста Асканія-Нова за період з 1 січня 2014 року до 31 грудня 2014 року включно. Заміри проводились щоденно з 2:00 до 23:00 з інтервалом у три години, на висоті 10-12 метрів [153].

2. Для другого експерименту сформовано 4 тестові вибірки з реальних даних швидкості вітру для міста Асканія-Нова за періоди з 1 березня до 31 березня 2014 року, 1 червня до 30 червня 2014 року, 1 вересня до 31 вересня 2014, 1 грудня до 31 грудня 2014 року. Заміри проводились щоденно з 2:00 до 23:00 з інтервалом у три години, на висоті 10-12 метрів. [153].

Як вихідні еталонні дані для обох експериментів використано вибірки з реальних даних швидкості вітру для міста Асканія-Нова за аналогічні періоди наступного року, а саме періоди з 1 березня до 31 березня 2015 року, 1 червня до 30 червня 2015 року, 1 вересня до 30 вересня 2015 та з 1 грудня до 31 грудня 2015 року.

В результаті обгрунтовано схему нейронної мережі, яка дозволяє з відносно сталою точністю прогнозувати значення швидкості вітру для різних вітрових районів України. Далі наведено структурну схему даної однонапрямленої ШНМ зворотного поширення похибки (рисунок 2.9):

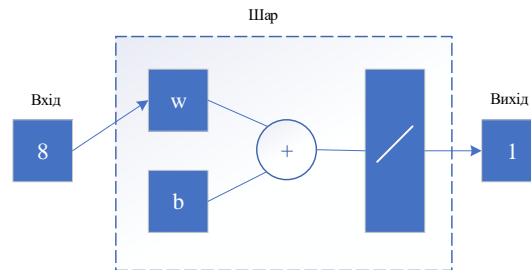


Рисунок – 2.9 Структурна схема однонапрямленої ШНМ зворотного поширення похибки

Дана структурна схема передбачає навчання нейронної мережі без застосування прихованих шарів, на вхід подаються 8 послідовних значень швидкості вітру, а на виході отримується 1 нове значення. В даній схемі нейрон використовує лінійну функцію активації для отримання вихідного значення. Для навчання нейронної мережі використано функцію, яка модифікує ваги і зміщення відповідно до алгоритму пружного зворотного поширення [89].

Результати проведених експериментів для міста Асканія-Нова для періоду 1-31 березня 2015 року подано на рисунках 2.10 – 2.12 (для періодів 1-30 червня, 1-30 вересня, 1-31 грудня наведено в Додатку Б, рисунки Б.5 – Б.13):

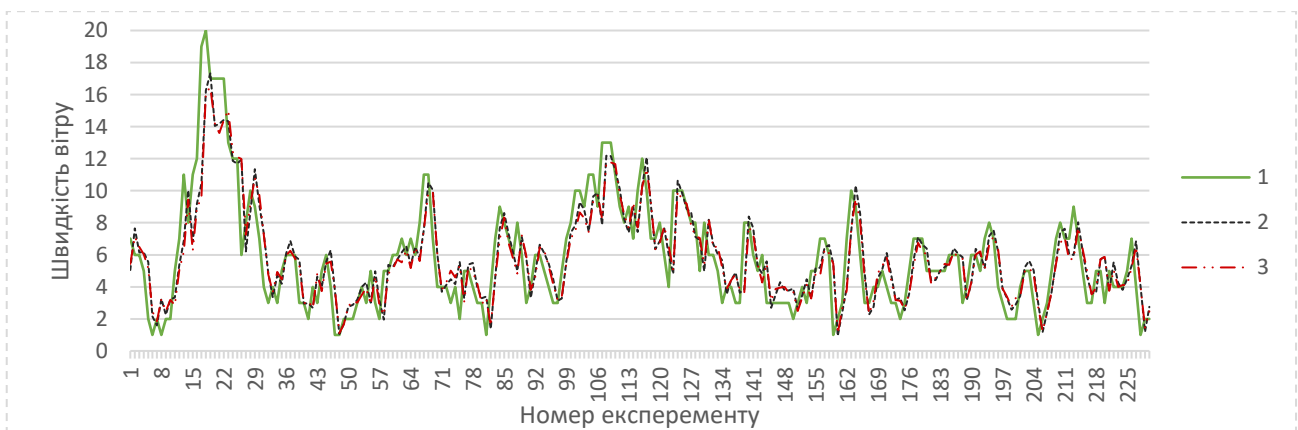


Рисунок – 2.10 Динаміка швидкості вітру на реальній та прогнозованій вибірках для міста Асканія-Нова, для періоду 1-31 березня 2015 року (1 –еталонні значення, 2 – перший експеримент, 3 – другий експеримент)

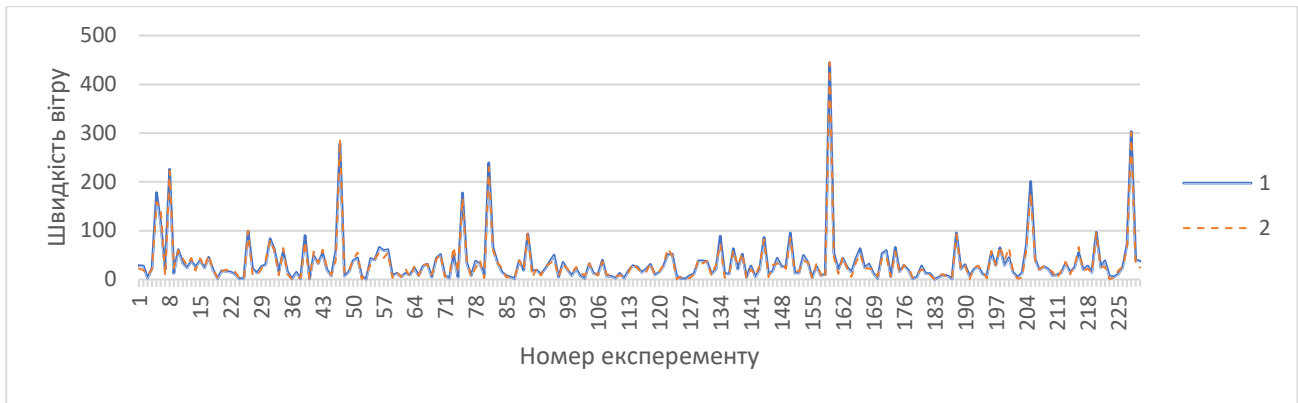


Рисунок – 2.11 Відхилення прогнозованих значень швидкості вітру від реальних у відсотках для міста Асканія-Нова, для періоду 1-31 березня 2015 року (1- перший експеримент, 2 - другий експеримент)

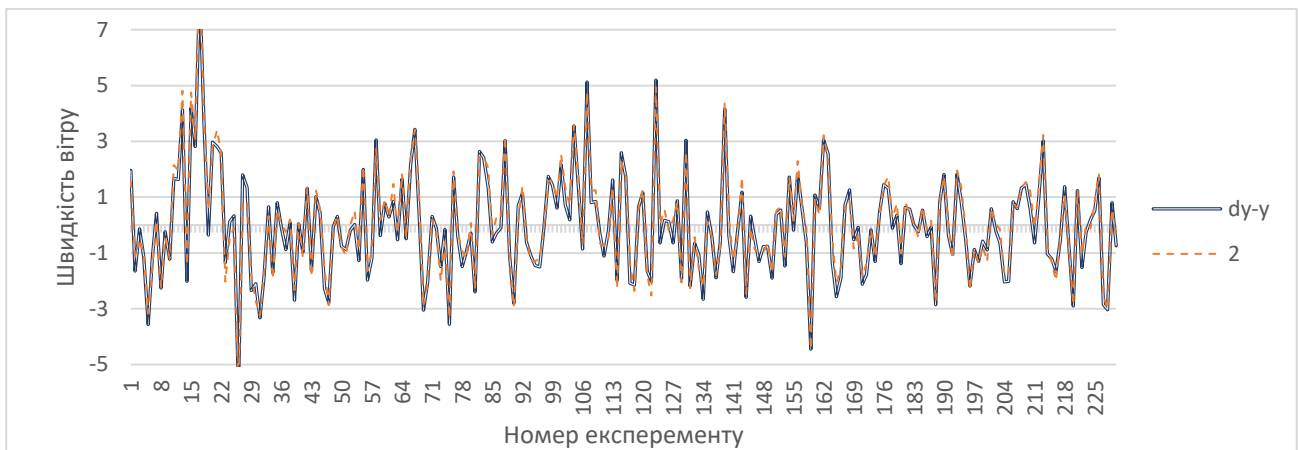


Рисунок – 2.12 Динаміка абсолютних відхилень прогнозованих значень швидкості вітру від реальних для міста Асканія-Нова, для періоду 1-31 березня 2015 року (1- перший експеримент, 2 - другий експеримент)

Об'єктивне визначення якості отриманого прогнозу є важливим етапом процесу прогнозування. Для оцінки прогнозу можна використовувати середньоквадратичну похибку (СКП). Проте значення СКП не достатньо для оцінки якості прогнозу, оскільки воно залежить від масштабу даних. Поглиблене оцінювання якості прогнозу досягається використанням критеріїв які дають відносні оцінки якості (Коефіцієнт Тейла, або ж коефіцієнт невідповідності прогнозу) та відносні оцінки у відсотках. Основною перевагою таких методів є їх незалежність від масштабу даних [21].

Коефіцієнт Тейла  $U$  розраховується залежністю:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{s} \sum_{k=1}^s [y(k+i) - \hat{y}(k+i)]^2}}{\sqrt{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s y^2(k+i) + \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \hat{y}^2(k+i)}} \quad (2.25)$$

де  $S$  – горизонт кроків прогнозування,  $y(k+i)$  – фактичні значення даних,  $\hat{y}(k+i)$  – оцінки прогнозів. Коефіцієнт Тейла є важливим ідентифікатором якості моделі прогнозу. Значення даного коефіцієнта, за означенням знаходяться в діапазоні від нуля до одиниці.  $0 \leq U \leq 1$ . При  $U \rightarrow 0$  оцінки прогнозів наближаються до фактичних значень ряду і відповідно модель має високу ступінь адекватності. За допомогою  $U$  можна встановити придатність моделі чи методу для прогнозування часового ряду.

В роботі для оцінювання якості прогнозу розраховались коефіцієнт Тейла, середньоквадратична похибка, та середнє абсолютне відхилення.

Середньоквадратична похибка прогнозу розраховується за формулою:

$$СКПП = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - y'_i|}{n} \quad (2.26)$$

де  $y_i$  – еталонне значення  $i$ -го елемента, де  $i \in (1;n)$ , а  $y'_i$  – прогнозоване значення  $i$ -го елемента,  $n$  – кількість значень у вибірці

Середнє абсолютне відхилення прогнозу розраховується як:

$$САВП = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|y_i - y'_i|}{y_i}}{n} * 100; \quad (2.27)$$

Аналіз результатів показує можливість застосування дослідженої структури нейронної мережі для прогнозування швидкості вітру для будь-якої пори року. Результати досліджень наведено у таблиці 2.3. З таблиці видно, відносно сталий відсоток відхилення для кожної з чотирьох пір року.

Таблиця 2.3

## Результати оцінювання якості прогнозу

Дата \ Показник	Березень		Червень		Вересень		Грудень	
	експ1	експ2	експ1	експ2	експ1	експ2	експ1	експ2
Коефіцієнт Тейла	0,2708	0,2708	0,3299	0,3224	0,3186	0,3115	0,3276	0,3246
Середньоквадратичне відхилення	3,3347	3,3344	2,2398	2,139	2,1549	2,0607	2,4429	2,3984
Середнє абсолютне відхилення, %	34,61	34,60	34,60	33,19	36,87	32,65	30,57	29,15

Аналіз результатів проведених досліджень обґрунтовує доцільність застосування однонапрямленої мережі з 8 елементами на вході та одним на виході для прогнозування швидкості вітру, в регіонах з високою вітровим енергетичним потенціалом.

Для навчання нейромережі використано дані швидкості вітру для досліджуваної місцевості, за аналогічний період попереднього року в першому експерименті, та за період в один рік для досліджуваної місцевості в другому експерименті.

В попередньому експерименті визначено структуру нейронної мережі, яка може бути використана для даного вітроенергетичного регіону задля короткострокового прогнозування швидкості вітру для будь-якого момент часу. Звісно, що універсальність структури нейронної мережі, збільшує похибку отриманого прогнозу, тому в кожному конкретному випадку може існувати необхідність підвищити точність прогнозу шляхом зміни її структури. Підвищення точності прогнозу досягається застосуванням різних типів нейронних мереж, способів (видів) навчання ШНМ, застосуванням різної кількості вхідних та вихідних сигналів.

Далі наведено структурні схеми нейронних мереж Елмана, каскадної ШНМ та однонапрямленої ШНМ зворотного поширення похибки для короткострокового прогнозування швидкості вітру у місті Дрогобич Львівської області для періоду з 1 січня 2015 року по 31 січня 2015 року включно. На вхід системи подається вектор з 64 відомих значень, результатом є прогнозована величина швидкості вітру. Для

вирішення завдання прогнозування швидкості вітру в досліджуваній місцевості побудовано три структурні схеми нейронних мереж. Кожна структурна схема реалізує різний тип нейронних мереж, а саме: мережу Елмана, однонаправлену ШНМ зворотного поширення похибки та каскадну нейронну мережу (рисунки 2.13 – 2.15).

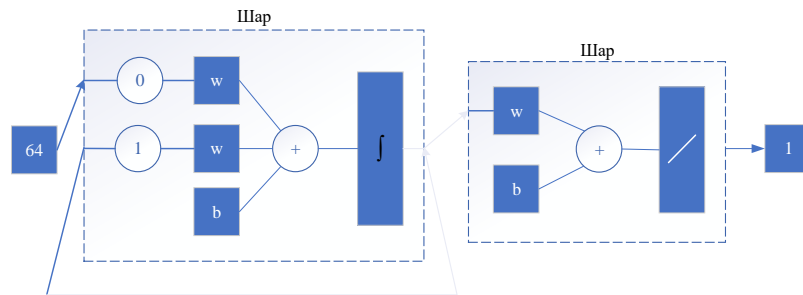


Рисунок – 2.13 Структурна схема нейронної мережі Елмана

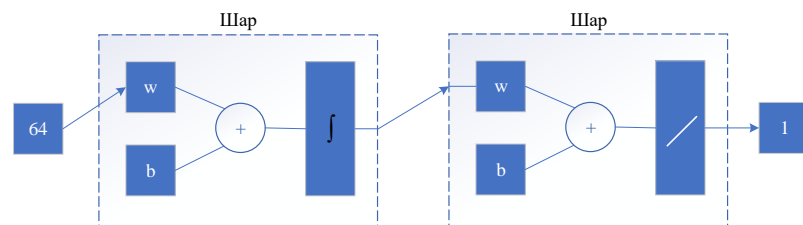


Рисунок – 2.14 Структурна схема однонаправленої нейронної мережі

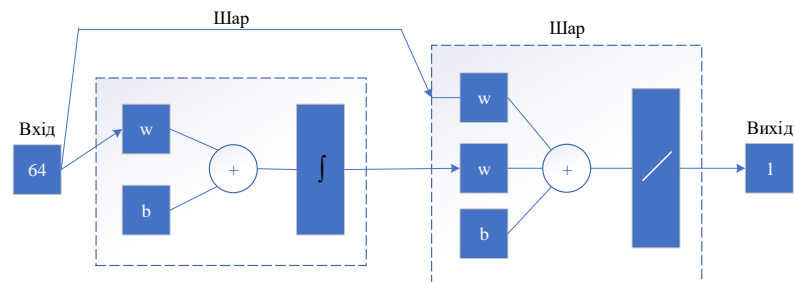


Рисунок – 2.15 Структурна схема каскадної нейронної мережі.

Здійснено навчання досліджуваних нейронних мереж та проведено аналіз результуючих даних. Результати дослідження прогнозування швидкості вітру для м. Дрогобич в період з 1 – 14 грудня 2015 року подано на рисунках( 2.16 – 2.18).

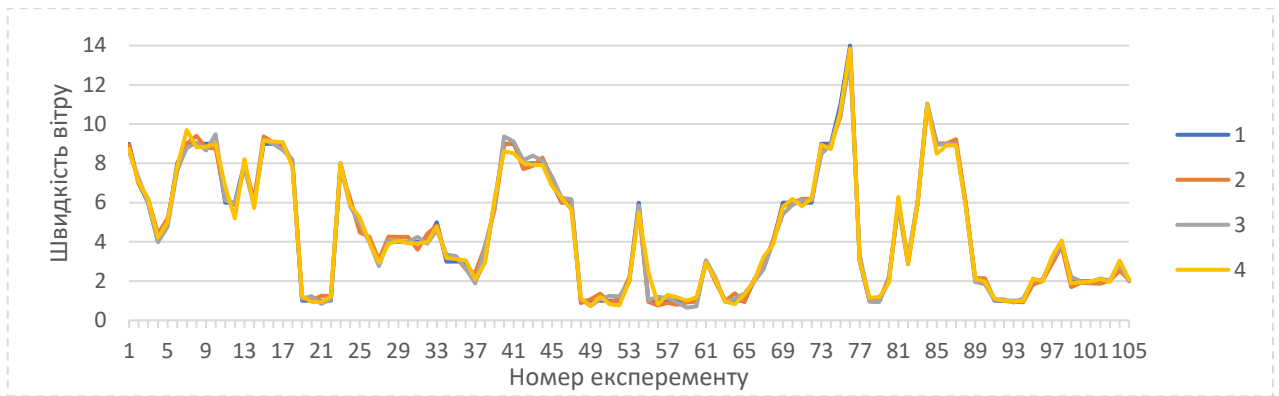


Рисунок – 2.16 Динаміка швидкості вітру на реальній та прогнозованій вибірках для міста Дрогобич, для періоду 1–14 грудня 2015 року (1 – реальні значення швидкості вітру, 2 – ШНМ зворотного поширення похибки, 3 – мережа Елмана, 4 – каскадна нейронної мережі.

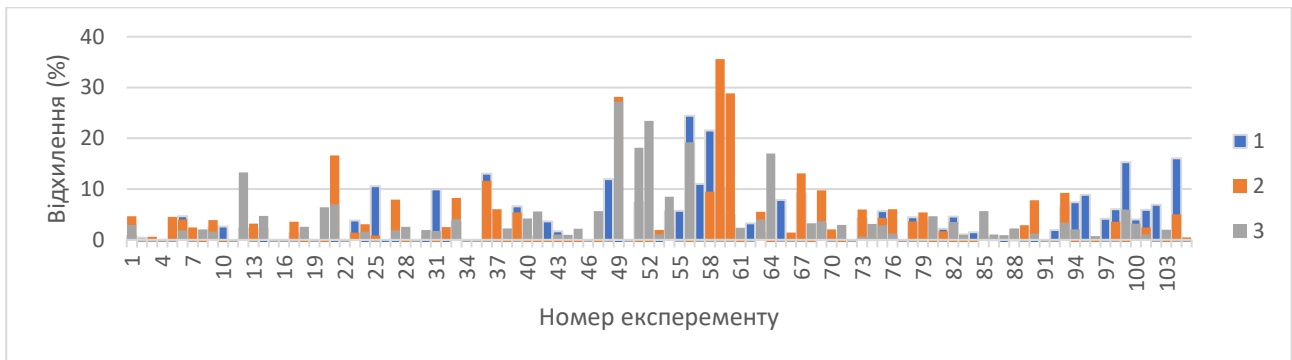


Рисунок – 2.17 Динаміка абсолютних відхилень прогнозованих значень швидкості вітру від реальних для міста Дрогобич, для періоду 1-14 грудня 2015 року (1 – однонапрямлена мережа зворотного поширення похибки, 2 – мережа Елмана, 3 – каскадна нейронна мережа.

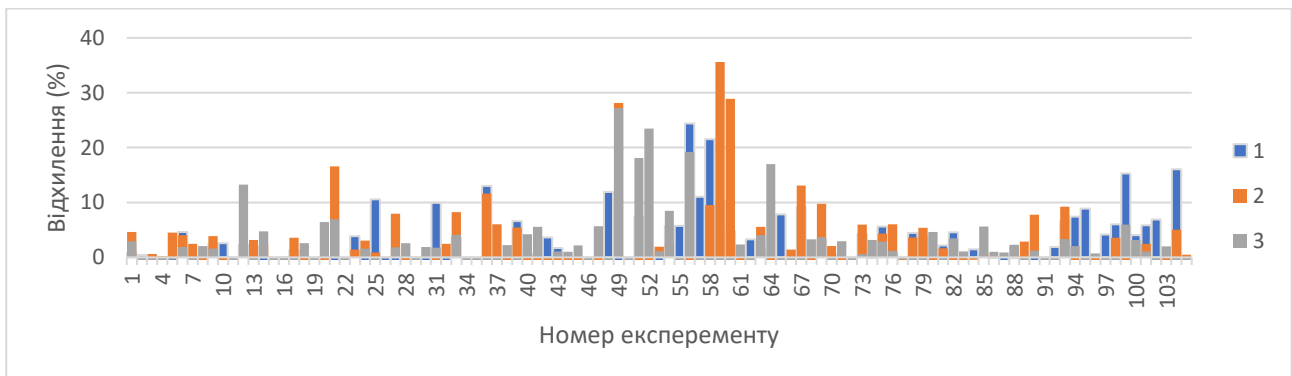


Рисунок – 2.18 Відхилення прогнозованих значень швидкості вітру від реальних у відсотках для міста Дрогобич, для періоду 1-14 грудня 2015 року (1 – однонапрямлена мережа зворотного поширення похибки, 2 – мережі Елмана, 3 – каскадна нейронна мережа.



Аналіз отриманих результатів прогнозування швидкості вітру наведено в таблиці 2.4

**Таблиця 2.4**

Результати оцінювання якості прогнозу при використанні мережі Елмана, каскадної ШНМ, та однонапрямленої ШНМ зворотного поширення похибки

Показник \ Тип ШНМ	Однонапрямлена	Елмана	Каскадна
Коефіцієнт Тейла	0,043	0,042	0,0474
середньоквадратична похибка прогнозу за n кроків.	0,0559	0,0535	0,068
середня абсолютна похибка у відсотках за n кроків. %	17,6988	18,1302	17,1876

Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити висновок, про високий відсоток точності прогнозування, який досягається використанням кожного з дослідженого типів нейронних мереж. Коефіцієнт невідповідності для кожного з досліджених типів ШНМ, становить менше 0,05 відсотка, а середня абсолютна похибка становить змінюється в діапазоні.17%–18%.

Аналіз результатів показує можливість ефективного прогнозування швидкості вітру з використання штучних нейронних мереж. При цьому встановлено залежність відхилення значень швидкості вітру від обраної структури ШНМ, величини навчальної вибірки та функції навчання мережі.

## **Висновки до розділу 2**

Розроблена модель управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції на основі продукційних правил з врахуванням ємності енергоакумулюючого елемента, забезпечує можливість ефективно досліджувати енергодинамічні процеси з метою аналізу їх параметрів. Продукційні правила побудовано з врахуванням змін таких параметрів: швидкість вітру, навантаження споживачів, енергетична ємність акумуляторної батареї.

Обґрунтовані алгоритми управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції з використанням енергоакумулюючого елемента дають змогу

пом'якшити наслідки перехідних процесів в періоди критичних погодних умов або навантажень споживачів.

Розроблений метод статистичного аналізу швидкості вітру забезпечує можливість визначення ймовірнісного діапазону робочих швидкостей, оцінювання співвідношення потужності ВЕС та енергоакumuлюючого елемента. Опрацювання архівних даних швидкості вітру з використанням розробленого методу за конкретний період часу дозволяє з необхідною точністю описати розподіл густини ймовірності частоти повторюваності швидкості вітру за допомогою нормального розподілу та двопараметричних сімейств абсолютно неперервних розподілів таких як: логнормальний розподіл, гамма розподіл, розподіл Вейбула [58]. Використання функцій густини розподілів дає змогу більш точно оцінити ймовірність появи заданої швидкості вітру, очікувану потужність вітрового потоку та тривалість робочої швидкості вітру [57]. Отримані результати покладено в основу розроблення блоку інтелектуалізації системи управління вітровою електричною станцією, який забезпечує визначення критеріїв ефективності окремих ВЕУ та попереднє опрацювання вхідних даних з врахуванням технічних параметрів ВЕУ та умов експлуатації.

Розроблений метод короткострокового прогнозування швидкості вітру сприяє зменшенню числа перевизначень активного складу вітрової електричної станції.

### 3. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОГО СКЛАДУ ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

У даному розділі розроблено метод визначення активного складу вітрової електричної станції, який ґрунтується на модифікації методу динамічного програмування, використовує експертні оцінки параметрів, узагальнений критерій ефективності вітрової електроустановки, доступну енергетичну ємність акумулюючого елемента та забезпечує можливість приймати рішення в режимі реального часу. Отримані результати використано при проектуванні системи управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції.

#### 3.1 Дослідження енергодинамічних процесів вітрової електроустановки

Аналіз останніх досліджень в галузі управління вітровими електричними станціями показує доцільність обґрунтування математичних моделей визначення потужності окремих вітрових електроустановок, задля можливості порівняння окремих ВЕУ між собою та з іншими джерелами енергії, визначення реальної потужності ВЕС, розрахунку енергетичного балансу між навантаженням та вітровою електростанцією, а також обґрунтування ефективних режимів роботи ВЕС, оскільки проведення реальних експериментів є недоцільним з технічних та економічних міркувань.

В загальному вітрова енергетична установка являє собою систему, яка отримує певні ресурси з визначеними параметрами (швидкість вітру, стан), опрацьовує їх та за допомогою передатної функції формує вихід [105]. Структурна схема вітрової електроустановки представлена на рисунку 3.1:

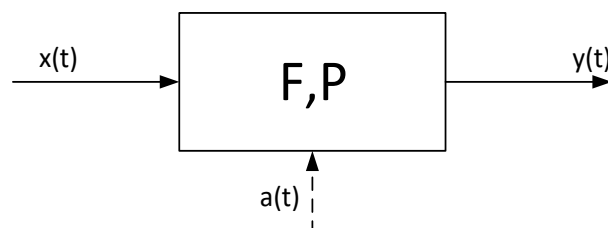


Рисунок – 3.1. Структурна схема вітрової енергетичної установки

де  $x(t)$  – швидкість вітру;  $F$  – передатна функція, що відображає вхід у вихід;  $P$  – експлуатаційний або конструктивний параметр. Активністю входу

вітрової енергоустановки, можна керувати за допомогою параметру  $a(t)$  ( $a(t) = 1$  - активізувати вхід,  $a(t) = 0$  - зробити вхід неактивним).

Для побудови математичної моделі простір вихідних елементів визначається співвідношенням [85]:

$$y(t) = F(x(t), P)a(t) \quad (3.1)$$

Розрахунок реальної потужності ВЕУ, залежно від її основних технічних параметрів та значення швидкості вітру, є важливим завданням при обґрунтуванні методів та засобів визначення активного складу вітрової електричної станції в кожний конкретний момент часу.

Швидкість вітру є важливою характеристикою регулювання потужності ВЕУ.

Кінетична енергія  $E_k$  вітрового потоку з поперечним січенням  $S$  розраховується за формулою [2]:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} \quad (3.2)$$

де  $v$  – швидкість вітру (м/с),  $m$  – масова повітря що протікає через січення  $S$  зі швидкістю  $v$ , визначається як:

$$m = \rho \cdot S \cdot v, \quad (3.3)$$

де  $\rho$  – щільність повітря (стандартне значення 1.225 кг/м<sup>3</sup> при  $t = +10^\circ C$  та нормальному атмосферному тиску  $B = 101,3$  кПа) в інших випадках розраховується, як  $\rho = 1,25 \cdot \frac{B}{760} \cdot \frac{288}{273+t}$ ;  $S$  – площа обтікання, отримана від обертання вітроколеса, через який проходить вітровий потік (м<sup>2</sup>).

Тоді потужність вітрового потоку обчислюється за формулою:

$$P_{en} = \frac{mv^2}{2} = \frac{\rho v^3}{2} S. \quad (3.4)$$

Оскільки вітроенергетична установка використовує лише частину потужності вітрового потоку, доцільно розрахувати потужність, яку розвиває вітрогенератор  $P_{вк}$  (механічну потужність вітродвигуна). Відношення потужності

вітрового потоку до потужності вітрового двигуна називають коефіцієнтом використання енергії вітру  $\xi$  (3.5):

$$\xi = \frac{P_{ен}}{P_{вк}} \quad (3.5)$$

Принципова відмінність  $\xi$  від коефіцієнта корисної дії в тому, що потужність не використання вітрового двигуна залишається в потоці, а не втрачається. Згідно з різними джерелами максимальне значення даного коефіцієнта для ідеального пристрою при 100 відсотковому використанні енергії вітру становить 0.6 – 0.68, проте у такому випадку потік повинен повністю зупинитися, що вже суперечить його наявності. В реальних умовах середнє значення коефіцієнта використання енергії вітру становить 0.4–0.55 [48].

Механічна потужність вітрової турбіни розраховується за формулою :

$$P_{вк} = \xi \cdot \frac{\rho v^3}{2} S \quad (3.6)$$

Потужність вітроустановки розраховується, як:

$$P_{BEV} = \eta \cdot P_{вк} = \frac{1}{2} \eta \cdot \xi \cdot \rho \cdot v^3 \cdot S \quad (3.7)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії генератора і трансмісії (зазвичай рівний 0.8 - 0.9);

Площа сліду обертання лопастей вітрового колеса визначається за формулою:

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \quad (3.8)$$

де  $D$  – зовнішній діаметр вітроколеса (м);  $d$  – внутрішній (по кінцям махів) діаметр вітроколеса (м).

Важливість впливу швидкості вітру на потужність вітрової електроустановки підтверджується залежністю (3.4), звідки випливає, що навіть незначне підвищення швидкості вітру зумовлює суттєве підвищення потужності вітрогенератора. Так середньостатистична ВЕУ при швидкості вітру 7 м/с генерує потужність на 38% більшу ніж при швидкості 6 м/с [102].

На основі аналізу останніх досліджень [153] обґрунтовано доцільність використання наведеного методу розрахунку потужності вітрової електроустановки, оскільки його використання забезпечує відхилення від реальних експлуатаційних параметрів в межах декількох відсотків.

### 3.2 Багатокритеріальне оцінювання ефективності вітрової енергоустановки

Основними параметрами, які характеризують ефективність вітроенергетичної установки, згідно з оцінками експертів, є [72]:

- технічний стан ВЕУ ( $K_1$ );
- кількість включень та виключень ВЕУ ( $K_2$ );
- кількість виробленої енергії ( $K_3$ );
- час напрацювання кожної окремої ВЕУ ( $K_4$ );
- мінімальна стартова швидкість, на якій робота ВЕУ можлива ( $K_5$ );
- максимальна робоча швидкість, на якій робота ВЕУ можлива ( $K_6$ ).

Ефективність вітрової енергетичної установки є важливим параметром, яким визначається участь ВЕУ у вироблені електроенергії, тобто можливість та доцільність включення ВЕУ в активний склад ВЕС з метою забезпечення навантаження споживачів. Вибір вітрових енергоустановок за строго визначеними критеріями забезпечує зростання економічної та технічної ефективності їх використання. Застосування багатокритеріального оцінювання ВЕУ забезпечує:

- зменшення кількості непланових ремонтів, шляхом своєчасного виявлення несправностей;
- покращення коефіцієнту використання енергії вітру;
- забезпечення рівномірного зношення окремих ВЕУ;
- збільшення періоду експлуатації ВЕУ;
- підвищення ефективності вітрової електричної станції в цілому.

Здебільшого, при порівнянні об'єктів, які мають різні часткові критерії застосовуються кількісні оцінки. Для цього кожній якісній оцінці критерію ставиться у відповідність певний бал. Коли об'єкт складається з великої кількості часткових критеріїв використовуються узагальнені (глобальні, інтегральні,

синтетичні, агреговані, комплексні) оцінки. Для розрахунку інтегральної оцінки здебільшого використовується арифметична сума часткових критеріїв:

$$C_{\Sigma} = K_1 + K_2 + \dots + K_n, \quad (3.9)$$

де  $C_{\Sigma}$  – інтегральна оцінка об'єкту,  $K_i$  – оцінка  $i$ -того критерію.

Проте, використання інтегрального оцінювання, в такому виді, має один суттєвий недолік, який пов'язаний з неможливістю врахування важливості кожного з критеріїв, тому для вирішення даної задачі вводяться вагові коефіцієнти важливості [3, 38, 74]. Кожному критерію методом експертних оцінок задається ваговий коефіцієнт важливості, що відображає вагу цього критерію в кожній окремій ситуації. Розрахунок інтегральної оцінки здійснюється за формулою:

$$K_{\Sigma} = w_1 K_1 + w_2 K_2 + \dots + w_n K_n \quad (3.10)$$

де  $w_i$  – коефіцієнт важливості  $i$  – того критерію. Чим більша вага  $w_i$  критерію  $K_i$  тим більший його вплив на загальну інтегральну оцінку предмета  $K_{\Sigma}$

[86]. Критерії вважаються однаково важливим якщо  $w_1 = w_2 = \dots = w_n = \frac{1}{n}$ .

Особливою задачею при розрахунку узагальненого критерію є спосіб додавання його часткових критеріїв. На практиці розрізняють однорідні та неоднорідні критерії. Однорідними вважаються критерії, які мають однакову (єдину, спільну) шкалу оцінок та можуть бути зіставними. Такі критерії легко порівнюються, оскільки для з'ясування чи є один з критеріїв важливішим за інший, а чи вони однакові не потрібно робити жодних додаткових операцій. Обов'язковою умовою однорідності є те, що кожна шкала градацій повинна віддзеркалювати однаковий рівень переваг для кожного із критеріїв.

На практиці існує велика кількість завдань, в яких використовуються неоднорідні критерії, наприклад вони виражають кількість виробленої енергії ( $\text{кВт} \cdot \text{год}$ ), час ( $\text{год}$ ), масу ( $\text{тонн}$ ), технічний стан (в балах), швидкість ( $\text{м/с}$ ), ємність ( $\Phi$ ). В такому випадку для побудови узагальненого критерію  $K_{\Sigma}$ , усі часткові критерії повинні бути приведені до спільної шкали оцінювання (зазвичай така шкала є безрозмірною), тобто іншими словами дані потрібно нормувати [32,

33, 34]. Часто застосовується так звана “швидка” нормалізація. Для цього, вихідне значення  $i$ -го часткового критерію ділиться на максимальне значення для цього критерію  $\max K_i$ , при цьому вважаються що перевага рівномірно зростає від нуля до максимального значення. Варто зазначити, що таке нормування даних може призвести до невірних рекомендацій. Тому для приведення всіх критеріїв до однієї шкали оцінювання на інтервалі  $[\alpha, \beta]$  доцільно використовувати лінійне перетворення. Для реалізації даного перетворення повинна виконуватися наступна умова  $0 \leq \alpha < \beta$ . Значення нормованого критерію  $K_i$  визначається за формулою:

$$\bar{K}_i = \frac{K_i - K_i^+}{K_i^+ - K_i^-}(\beta - \alpha) + \alpha \quad (3.11)$$

де  $K_i^+ = \max$ ,  $K_i^- = \min$ ,  $K_i^+ \neq K_i^-$ ,  $i \in [1, m]$

В даній моделі одиниця кроку визначається коефіцієнтом  $a_i = \frac{(\beta - \alpha)}{K_i^+ - K_i^-}$ , а коефіцієнт  $b_i = (\alpha K_i^+ - \beta K_i^-) / (K_i^+ - K_i^-)$  дозволяє привести часткові критерії до загального початку відліку та однакового інтервалу вимірювання. Нормування даних описаною методикою дає змогу зробити їх однорідними та придатними для подальшого опрацювання.

На даний час існує велика кількість методів визначення вагових коефіцієнтів важливості [77, 103, 171]. Найвідомішими з них є метод Сааті, метод Уея, метод Коггера і Ю, шкала Фішберна, принцип нечіткої більшості, інколи для визначення вагових коефіцієнтів застосовують метод найменших квадратів [25, 65, 92].

Аналіз останніх досліджень [72, 74] обґрунтував ефективність застосування методу Сааті (методу аналізу ієрархій) для визначення вагових коефіцієнтів важливості при обчисленні ефективності вітроенергетичної установки.

На першому кроці методу попарного порівняння Сааті [74], передбачається створення експертами квадратної матриця  $A$  [92]:



$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Наступним є знаходження визначника матриці  $\lambda$  (власного значення матриці), при умові, що  $Aw = \lambda w$  і  $w \neq 0$ , а ненульовий вектор  $w$  – відповідний йому власний вектор.

Для цього задача записується в наступному вигляді:

$$(A - \lambda E)w = 0, \quad w \neq 0 \quad (3.13)$$

Для існування нетривіального розв'язку цієї задачі повинна виконуватись умова:

$$\det(A - \lambda E) = 0 \quad (3.14)$$

На наступному кроці приймається найбільше зі знайдених власних значень  $\lambda$  [172], та підставляється в однорідну систему (3.12), отримана матриця  $A'$  буде мати вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} - \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a'_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a'_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a'_{mm} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

У розгорнутій формі задача (3.15) має вигляд:

$$\begin{cases} a_{11}w_1 + a_{12}w_2 + \dots + a_{1m}w_m = 0 \\ a_{21}w_1 + a_{22}w_2 + \dots + a_{2m}w_m = 0 \\ \dots \\ a_{m1}w_1 + a_{m2}w_2 + \dots + a_{mm}w_m = 0 \end{cases} \quad (3.16)$$

Далі одне з рівнянь замінюється умовою нормування  $\sum_{j=1}^m \lambda_j = 1$ . Для

розв'язання системи лінійних алгебраїчних найчастіше використовують метод Гауса (метод виключення невідомих) [27, 93, 106].

Спрощена структура матиме вид:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \Rightarrow \lambda \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (a_{11} - \lambda)w_1 + a_{12}w_2 + a_{13}w_3 + a_{14}w_4 + a_{15}w_5 + a_{16}w_6 \\ a_{21}w_1 + (a_{22} - \lambda)w_2 + a_{23}w_3 + a_{24}w_4 + a_{25}w_5 + a_{26}w_6 \\ a_{31}w_1 + a_{32}w_2 + (a_{33} - \lambda)w_3 + a_{34}w_4 + a_{35}w_5 + a_{36}w_6 \\ a_{41}w_1 + a_{42}w_2 + a_{43}w_3 + (a_{44} - \lambda)w_4 + a_{45}w_5 + a_{46}w_6 \\ a_{51}w_1 + a_{52}w_2 + a_{53}w_3 + a_{54}w_4 + (a_{55} - \lambda)w_5 + a_{56}w_6 \\ a_{61}w_1 + a_{62}w_2 + a_{63}w_3 + a_{64}w_4 + a_{65}w_5 + (a_{66} - \lambda)w_6 \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda \Rightarrow \quad (3.17)$$

$$\Rightarrow w = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6)$$

На наступному етапі відбувається приведення всіх критеріїв до однієї шкали оцінювання на інтервалі  $[\alpha, \beta]$  за допомогою лінійних перетворень (алгоритм лінійного перетворення описано вище). В результаті, формула для обчислення узагальненої оцінки ефективності окремої вітрової електроустановки буде мати вигляд:

$$C = \sum_{i=1}^n w_i K_i \quad (3.18)$$

Даний метод дає змогу розрахувати коефіцієнт ефективності окремої вітроенергетичної установки ВЕС, на основі багатьох динамічних критеріїв. Коефіцієнт ефективності вітроенергетичної установки, є вхідним параметром при формуванні активного складу вітрової електричної станції.

### 3.3 Формулювання завдання визначення активного складу вітрових електричних установок

Задача пакування рюкзака належить до класу задач комбінаторної оптимізації. Вона полягає в наповненні рюкзака, що здатен витримати конкретну вагу, предметами, кожен з яких має свою вагу та ціну так щоб максимізувати сумарну вартість, але не перевищити максимально допустиму масу. Для

формалізації класичної задачі пакування рюкзака необхідно виділити два параметри це ціна та вага. У випадку її застосування для визначення активного складу ВЕС, під вагою розуміємо навантаження споживачів, яке необхідно забезпечити, а під ціною – ефективність кожної окремої вітроустановки в даний момент [69, 70, 73, 75]. Кожна ВЕУ має свою номінальну потужність, робочі швидкості вітру, технічний стан, гарантійний термін експлуатації, кількість циклів включень та виключень, кількість виробленої енергії до настання планового ремонту, які в сукупності формують її ефективність. Багатокритеріальний метод оцінювання ефективності вітроустановки наведено в [72].

В такому випадку умова задачі пакування рюкзака формулюється так: існує певний набір вітроенергетичних установок, які формуються у вітрову електричну станцію. Необхідно визначити такий набір активних вітроенергетичних установок, щоб забезпечити максимальну ефективність вітрової електричної станції, і щоб сумарна потужність ВЕС при цьому, не перевищувала навантаження споживачів. Математично умова даної задачі має вигляд:

$$b_1 w_1 + \dots + b_N w_N \leq W \quad (3.19)$$

$$b_1 p_1 + \dots + b_N p_N \rightarrow \max \quad (3.20)$$

де  $N$  – кількість вітроенергетичних установок ВЕС,  $W$  – навантаження споживачів, яке необхідно забезпечити,  $w = \{w_1, w_2, \dots, w_N\}$  – набір потужностей вітроенергетичних установок,  $p = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$  – набір ефективностей вітроенергетичних установок.  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$  – набір бінарних величин,  $b_i = 1$ , якщо ВЕУ з номером  $n_i$  включена в набір,  $b_i = 0$ , якщо ВЕУ з номером  $n_i$  не включена в набір.

### 3.4 Ефективність методів розв'язання задачі пакування рюкзака при визначенні активного складу вітрової електричної станції

В роботах [56, 71, 115, 162] здійснено дослідження методів розв'язання задачі пакування рюкзака для визначення активного складу вітрової електричної станції. На даний час існує велика кількість методів які дозволяють отримати наближений

або точний розв'язок задачі пакування рюкзака. До методів, які дають забезпечують одержання наближеного розв'язку відносяться: жадібний алгоритм, генетичний алгоритм, метод мурашиної колонії [64]. Особливістю таких методів є суттєве зменшення розмірності задачі, а також складності алгоритму до поліноміального часу, що в свою чергу призводить до отримання наближеного результату [124].

Найбільш відомими методами для знаходження точного розв'язку задачі пакування рюкзака є: метод повного перебору, метод гілок і границь, метод динамічного програмування.

#### *Жадібний алгоритм*

Суть жадібного алгоритму на практиці полягає у сортуванні предметів (ВЕУ) за вартістю, після чого відбувається додавання предметів з найбільшою вартістю в результуючий набір [82]. Додавання наступного предмета відбувається за умови, достатньої місткості. Час роботи даного алгоритму складається з часу сортування і часу укладання. Складність сортування предметів становить  $O(N \log N)$ . Перевагою даного методу є вища, порівняно з іншими методами швидкість та нижча складність, проте даний алгоритм не забезпечує отримання оптимального розв'язку, тому не є ефективним для вирішення задачі вибору активного складу вітроенергетичних установок ВЕС.

#### *Генетичні алгоритми*

На практиці, в певних випадках можливе використання генетичних алгоритмів для вирішення задачі пакування рюкзака [55]. Вони не гарантують знаходження оптимального рішення за поліноміальний час і не дають оцінку близькості рішення до оптимального, але володіють хорошими тимчасовими показниками, дозволяючи знайти рішення швидше за інші відомі детерміновані або евристичні методи. [13].

Кожна особина (генотип) являє собою підмножину предметів, які ми хочемо упакувати в рюкзак (їх загальна вага може перевищити допустиму вантажопідйомність). Для зручності інформація зберігається у вигляді бінарних рядків, в яких кожен біт визначає, поміщається даний предмет в рюкзак чи ні.

Функція пристосованості визначає близькість рішення до оптимального [146]. Прикладом такої функції може бути сумарна цінність предметів, за умови, що сумарна вага не перевищує вантажопідйомність. Після серії змін поколінь, в яких схрещуються найбільш пристосовані особини і ігноруються ті які залишаються, алгоритм, по припущенню, повинен покращити вихідні рішення [1].

### *Алгоритм мурашиної колонії*

В роботах М. Dorigo, А. Coloni, L.M. Gambardella, V. Maniezzo [51, 84, 131, 132, 140, 186] здійснено дослідження методу мурашиної колонії та запропоновано варіант нечіткої мурашиної системи для розв'язання задачі пакування рюкзака. Основна ідея даного методу – це пошук рішення, базуючись на поведінці мурах. Алгоритм виконує послідовність дій, які зазвичай мурахи виконують при виборі шляху до певного предмету. Мурашині алгоритми засновані на імітації природних механізмів самоорганізації мурах. Самоорганізація в даному розумінні, є результатом взаємодії таких складових як випадковість, багатократність, позитивний зворотній зв'язок та негативний зворотній зв'язок [51]. Багатократність застосовується для ітераційного пошуку визначення оптимального набору предметів вибраного мурахою в рюкзак. На кожній ітерації кожна окрема мураха набирає повний рюкзак, як окрема незалежна особа, яка самостійно вирішує задачу.

В даному алгоритмі прийняття рішення мурахою залежить від таких параметрів як: пам'ять мурахи, важливість предмету, а також феромон. Під пам'яттю мурахи розуміють список предметів, які вже були обрані нею, а отже повторне їх взяття неможливе. Сюди також включаються всі предмети, вибір яких порушує обмеження по об'єму рюкзака.

Феромон – це речовина, яка виділяється мурахою, як слід, при переміщені, це по суті передача певної інформації іншим особинам, з використанням навколишнього середовища. Чим більшою є концентрація феромону на певному шляху тим більше мурах будуть рухатись ним. Розподіл феромону по шляхах, по яких пересуваються мурахи, є свого роду глобальною пам'яттю колонії, яка динамічно змінюється. Віртуальний слід феромону на предметі  $j$  визначає бажання

взяти предмет  $j$ . Кількість феромону на предметі  $j$  на ітерації  $t$  зазвичай позначається як  $\tau_j(t)$

Важливість ( $\eta_j$ ) – це величина яка виражає бажання включення в рюкзак певного предмету, вона залежить від таких характеристик предмету, як ціна, маса, об'єм і на відмінну від пам'яті мурахи та віртуального сліду феромону є постійною для кожної конкретної задачі. Важливість розраховується як:

$$\eta_j = \frac{c_j}{\sum_{i=1}^m \frac{a_{ij}}{b_i}} \quad (3.21)$$

де  $i=1..m$ ,  $m$  – кількість обмежень задачі. Нормування на коефіцієнт  $b_i$  вводиться для масштабування величин до одного порядку.

Вірогідність  $k$  мурахи взяти предмет  $j$  на ітерації  $t$  дорівнює:

$$P_{j,k}(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_j(t)]^\alpha \cdot [\eta_j]^\beta}{\sum_{j \in J_k} [\tau_j(t)]^\alpha \cdot [\eta_j]^\beta} & \text{if } j \in J_k \\ 0, & \text{if } j \notin J_k \end{cases} \quad (3.22)$$

де  $\alpha$  та  $\beta$  – параметри, які задають вагу та ціну предмета при виборі маршруту.

Вибір предметів мурахами відбувається одночасно, тому в кожній мурахи є свій власний набір предметів, проте слід феромону на предметах у мурашиної колонії є спільним і інтерпретується в поведінці мурах. Зміна сліду феромону на предметах відбувається після того, як кожна мураха набрала свій рюкзак з предметами [133]. Величина зміни може бути сталим значенням, а може також залежати від загальної цінності запакованого набору предметів.

Основні кроки алгоритму мурашиної колонії:

1. Ініціалізація параметрів алгоритму:  $\alpha$  та  $\beta$ ,  $p$  та  $q$ ,  $m$ ,  $\tau_0$ ,  $N$  – кількість ітерацій алгоритму.
2. Задання сліду феромону  $\tau_0$  на предметах, розрахунок важливості предметів  $\eta_j^i$

Основний цикл (повторюється  $N$  раз). *Початок:*

3. Вибір кожною мурахою власної колонії предметів по ймовірно–пропорційному правилу (2). Мураха вибирає предмети до тих пір поки її пам'ять не буде включати всіх предметів. В момент коли всі мурахи склали власні набори предметів, розраховується їх цінність.

4. Оновлення сліду феромону на предметах, за допомогою вибраної на початку роботи алгоритму схеми: ant-density, ant-cycle.

5. Пошук кращого рішення  $f_{\max}$  на ітерації, порівняння з найкращим рішенням  $f^*$ : якщо  $f_{\max} > f^*$ , тоді  $f^* = f_{\max}$  і повернення на крок 3.

*Кінець:* Отримане значення  $f^*$  – рішення задачі.

Метод мурашиної колонії, належить до наближених методів, та дозволяє знайти близьке до оптимального рішення за значно менший час, в порівнянні з точними методами, такими як метод динамічного програмування, метод гілок та границь навіть для розмірності ( $n > 30$ ). Крім того часова складність даного методу є поліноміальною функцією, на відміну від точних методів, де вона має експоненціальну залежність.

#### *Метод повного перебору*

Метод повного перебору – це метод визначення оптимального рішення шляхом перебору всіх можливих варіантів значень. Основна проблема даного методу, полягає в зміні складності, залежно від кількості вхідних значень. Будь-яка задача NP складності може бути вирішена за допомогою методу повного перебору, при цьому, навіть для варіанту коли розрахунок цільової функції здійснюється за поліноміальний час, залежно від кількості всіх можливих комбінацій, повний їх перебір може потребувати експоненціального часу роботи [46, 47, 101]. На основі обчислювальної складності даного алгоритму ґрунтується оцінка криптостійкості шифрів. Криптостійким вважається шифр, який не може бути зламаний за час істотно більший ніж повний перебір всіх можливих варіантів.

Результат роботи алгоритму повного перебору може бути представлений у вигляді дерева. На рисунку 3.2 наведено дерево перебору можливих варіантів, яке

складається з 4 рівнів. В кожному з квадратів подано вагу предмету, корінь дерева має вагу рівну 0, та означає що рюкзак пустий. Перший предмет можна обирати чотирма способами, другий – трьома способами, третій – двома, а далі можна взяти лише один предмет. При істотному збільшенні вхідної вибірки значень метод повного перебору може не знайти оптимального рішення за адекватну тривалість часу. Часова складність даного алгоритму складає  $O(2^N)$  [46].

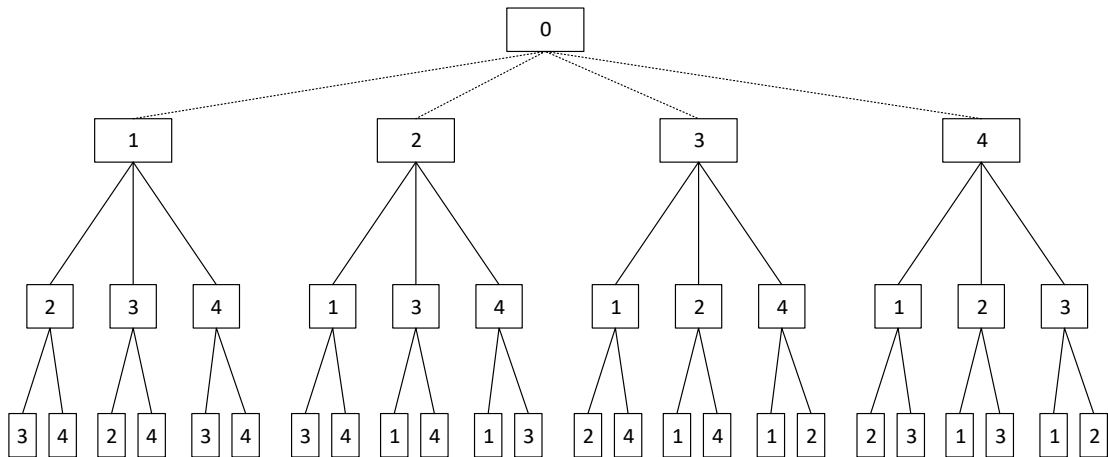


Рисунок – 3.2 Схематичне представлення роботи методу повного перебору

Аналіз даного методу свідчить про недоцільність його застосування при розв'язанні задачі пакування рюкзак для визначення активного складу вітрової електричної станції. Для розв'язання таких задач використовують більш оптимізовані методи.

#### *Метод гілок та границь*

Метод гілок і границь є загальним алгоритмічним методом для знаходження оптимальних рішень задач дискретної та комбінаторної оптимізації. По своїй суті, метод є варіацією методу повного перебору з виключенням свідомо не оптимальних рішень; перебір при цьому ведеться лише серед варіантів, які залишилися і є в певному сенсі «перспективними» [82]. Вирішення задач дискретної оптимізації пов'язано з труднощами принципового характеру. Повний перебір точок допустимої множини, як правило неможливий через занадто великий обсяг обчислювальної роботи. Через дискретність допустимої множини неможливо застосувати багато прийомів розроблених в математичному програмуванні, наприклад, рух у напрямку градієнта, перехід з однієї вершини багатогранної множини в іншу і т.д. Метод гілок і границь заснований на



послідовному розбитті допустимої множини на підмножини (розгалуження, гілки) та обчисленні оцінок (границь) значень цільової функції на цих підмножинах, що забезпечує відкидання підмножин, які не містять рішень [42, 87, 108].

Якщо потрібно вирішити задачу  $f(x) \rightarrow \min, x \in X$ . В залежності від специфіки задачі, необхідно вибрати деякий спосіб обчислення оцінок знизу  $d(X_i)$  та функції  $f(x)$  на множині  $x_i \subseteq X$ :

$$d(X_i) \leq f(x) \quad \forall x \in X_i \quad (3.23)$$

Оцінка знизу часто обчислюється шляхом релаксації, тобто заміною задачі мінімізації функції  $f(x)$  по множині  $X_i$  задачею мінімізації по більш широкій множині  $X'_i, X_i \subseteq X'_i$ :

$$d(X_i) = \min_{x \in X'_i} f(x) \quad (3.24)$$

На практиці релаксація цілочисельної задачі може полягати в відкиданні умови цілочисельності. Далі вибирається правило розгалуження, яке полягає у виборі підмножини для розгалуження  $X_i$  з числа підмножин, на які до цього кроку розбита множина  $X$ , а також у виборі способу розбиття  $X_i$  на непересічні підмножини. При розв'язанні релаксаційної задачі може виявитися що:

1. допустима множина релаксаційної задачі  $X'_i$  порожня, а отже  $X_i = 0$ ;
2. оцінка  $d(X_i)$  мінімуму релаксаційної задачі є більша, або рівна найменшому з уже обчислених значень функції  $f(x)$  (поточному значенню рекорду) і, відповідно,  $\min_{x \in X} f(x)$  досягається поза множиною  $X_i$ ;
3. точка мінімуму для релаксаційної задачі  $x' \in X'_i$  і відповідно, є точкою мінімуму  $f(x)$  на  $X_i$ . У такому випадку змінюється поточне значення рекорду, якщо попереднє значення є більшим за значення в знайденої точці  $f(x')$ .

У всіх трьох випадках множина  $X_i$  виключається з числа кандидатів на подальше розгалуження.

На кожному кроці, шукане значення мінімуму є не більшим за поточне значення рекорду і не меншим за найменшу з оцінок знизу, які входять в число кандидатів на розгалуження. Це дає змогу вирішувати завдання наближено.

Для вирішення задачі цілочисельного лінійного програмування з обмеженою допустимою множиною (наприклад задача пакування рюкзака) можна використовувати наступний алгоритм методу гілок і меж (алгоритм Ленд-Дойг). З самого початку вирішується релаксаційна задача лінійного програмування, наприклад симплекс методом. Якщо отримане рішення  $x^1$  ціле, то задача розв'язана. В іншому випадку, на першому кроці алгоритму вибирається будь-яка нецілочисельна, компонента отриманого рішення  $x_{r_1}^1$ ,  $1 \leq r_1 \leq n$  і вихідна задача розгалужується на дві підзадачі: перша з додатковим обмеженням  $x_{r_1} \leq \lfloor x_{r_1}^1 \rfloor$ ; друга – з додатковим обмеженням  $x_{r_1} \geq \lfloor x_{r_1}^1 \rfloor + 1$ . Обчислюються оцінки знизу і якщо є кандидати на розгалуження переходять до наступного кроку. На  $k$ -ому кроці вибрана на  $(k-1)$  кроці підзадача розгалужується на дві нові з додатковими обмеженнями  $x_{r_k} \leq \lfloor x_{r_k}^k \rfloor$  та  $x_{r_k} \geq \lfloor x_{r_k}^k \rfloor + 1$  – відповідно, де  $x_{r_k}^k$  – будь-яка нецілочисельна складова рішення  $x^k$  задачі ЛП, отриманої в результаті релаксації  $(k-1)$  підзадачі. Робота алгоритму завершується коли кандидатів на розгалуження більше немає. Поточний рекорд стає рішенням задачі. Скінченність алгоритму гарантується обмеженістю допустимої множини.

Результат роботи алгоритму гілок та границь, як і методу повного перебору може бути поданий у вигляді дерева. Візьмемо приклад наведений для методу повного перебору (рисунок 3.2) та встановимо обмеження на вагу рюкзака  $W=5$ , в такому випадку кількість варіантів перебору можна скоротити в 3 рази, з 24 до 8 (рисунок 3.3):

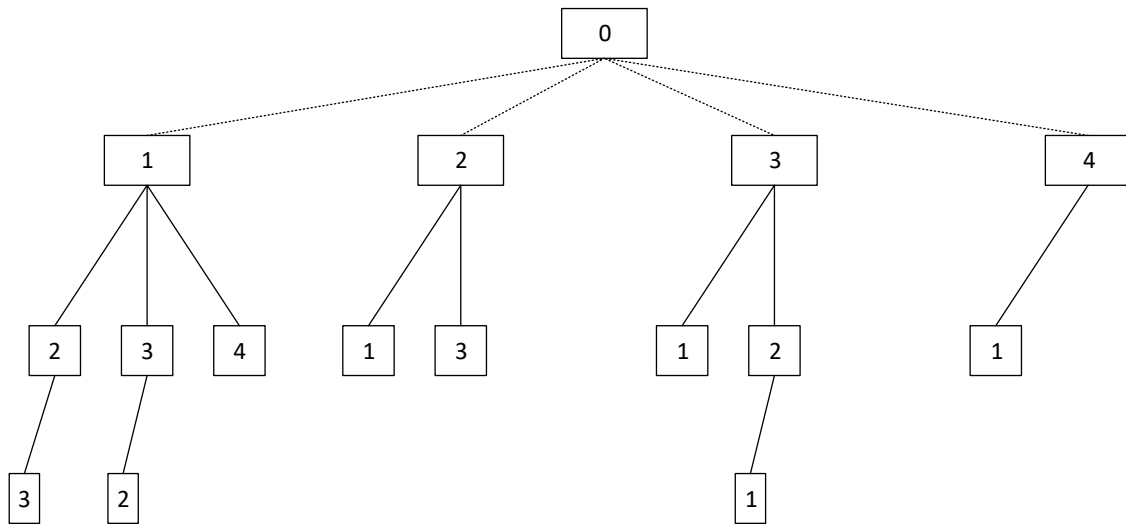


Рисунок – 3.3 Схематичне представлення роботи методу гілок та границь

В методі гілок і границь на відміну від методу повного перебору кожен предмет може бути як доданий так і пропущений, а кожна ситуація дає окремий вузол в дереві рішення. Недоліком даного методу є залежність від набору даних, завжди можна потрапити на такий набір вхідних даних при яких часова складність методу гілок і границь буде аналогічна методу повного перебору.

#### *Метод динамічного програмування*

Застосування методу динамічного програмування для розв'язання задачі пакування рюкзака при визначенні активного складу ВЕС, дає змогу з множини вітроенергетичних установок за параметрами “потужність” та “ефективність”, відібрати певну кількість таким чином, щоб отримати максимальну сумарну ефективність, при одночасному дотриманні вимог щодо сумарної потужності набору ВЕУ, яка не повинна перевищувати навантаження споживачів.

В загальному вигляді алгоритм розв'язання задачі пакування рюкзака складається з прямого та зворотного ходу [17]. Процес знаходження максимального значення функції мети називаються прямим ходом, а процес відновлення набору предметів на основі знайденої функції мети зворотним ходом [18, 19].

### Прямий хід алгоритму

Дано  $N$  предметів,  $W$  – місткість рюкзака,  $w = \{w_1, w_2, \dots, w_N\}$  – відповідний йому набір позитивних цілих ваг,  $p = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$  – відповідний йому набір позитивних цілих вартостей. Потрібно знайти набір бінарних величин  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ , де  $b_i = 1$ , якщо предмет  $n_i$  включений в набір,  $b_i = 0$ , якщо предмет  $n_i$  не включений, при цьому повинна дотримуватись вимога:

$$b_1 w_1 + \dots + b_N w_N \leq W \quad (3.25)$$

$$b_1 p_1 + \dots + b_N p_N \rightarrow \max \quad (3.26)$$

Алгоритм розв'язання задачі пакування рюкзака класичним методом динамічного програмування:

Нехай  $A(k, s)$  – максимальна вартість предметів, які можна покласти в рюкзак місткості  $s$ , якщо можна використовувати тільки перші  $k$  предметів, тобто  $\{n_1, n_2, \dots, n_k\}$  – набір допустимих предметів для  $A(k, s)$ , при цьому  $k \in [0; N]$ , а  $s \in [0; W]$

$$A(k, 0) = 0 \quad (3.27)$$

$$A(0, s) = 0 \quad (3.28)$$

### Алгоритм знаходження проміжних оптимумів $A(k, s)$

Якщо предмет  $k$  не потрапив в рюкзак,  $A(k, s)$  дорівнює максимальній вартості рюкзака з такою ж місткістю і набором допустимих предметів  $\{n_1, n_2, \dots, n_{k-1}\}$ , тобто  $A(k, s) = A(k-1, s)$ .

Якщо предмет  $k$  потрапив в рюкзак,  $A(k, s)$  дорівнює максимальній вартості рюкзака, де вагу  $s$  зменшуємо на вагу  $k$ -ого предмета, а набір допустимих предметів  $\{n_1, n_2, \dots, n_{k-1}\}$  збільшено на вартість  $k$ , тобто (3.29, 3.30):

$$A(k-1, s - w_k) + p_k \quad (3.29)$$

$$A(k, s) = \max(A(k-1, s), A(k-1, s - w_k) + p_k) \quad (3.30)$$

Структурна схема прямого ходу алгоритму подана на рисунку 3.4:

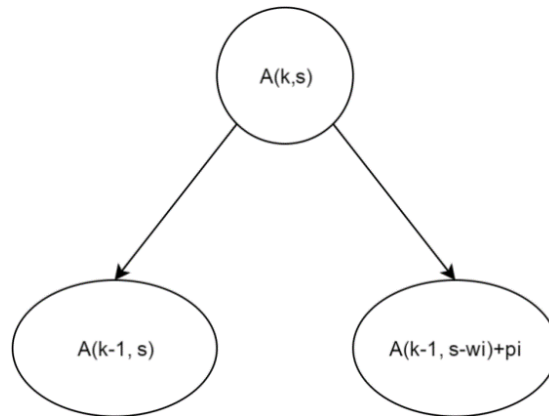


Рисунок – 3.4 Структурна схема прямого ходу алгоритму

Вартість шуканого набору дорівнює  $A(N, W)$ .

### Зворотній хід алгоритму

На даному етапі здійснюється відновлення набору предметів, які входять в рюкзак, забезпечують вартість  $A(N, W)$  та місткість рюкзака  $W$ .

Робота алгоритму починається з елемента  $A(i, w)$ , де  $i = N$ ,  $w = W$  матриці розмірності  $[N \times W]$ . На цьому етапі визначається чи входить предмет  $n_i$  в шуканий набір. Для цього здійснюється порівняння  $A(i, w)$  з наступними значеннями:

- максимальна вартість рюкзака з такою ж місткістю і набором допустимих предметів  $\{n_1, n_2, \dots, n_{i-1}\}$ , тобто  $A(i-1, w)$ ;
- максимальна вартість рюкзака з місткістю на  $w_i$  менше і набором допустимих предметів  $\{n_1, n_2, \dots, n_{i-1}\}$  плюс вартість  $p_i$ , тобто  $A(i-1, w-w_i) + p_i$ .

На прямому ході алгоритму при побудові матриці  $A$  розмірністю  $[N \times W]$ , на кожній ітерації алгоритму заноситься  $\max(A(k-1, s); A(k-1, s-w_k) + p_k)$ , тому на зворотному ході алгоритму, якщо значення  $A(i, w)$  з  $A(i-1, w)$  рівні, предмет  $n_i$  не входить в шуканий набір, інакше входить.

Недолік даного методу це відносно висока часова складність, яка підвищується зі збільшенням об'єму даних, складність алгоритму складає

$O = N \times W$ , що на великих значеннях  $N$  та  $W$  призводить до суттєвих часових затримок.

Таблиця 3.1

## Порівняльний аналіз досліджуваних методів

Метод	Тип алгоритму	Складність	Переваги	Недоліки
Жадний алгоритм	Наближений	$O(N \cdot \log N)$	Висока швидкодія, може працювати з великими значеннями $n$ ; простота реалізації	Рішення не точне
Генетичний алгоритм	Наближений	$O(N)$	Висока швидкодія; можливість працювати з великими значеннями $n$ ; незалежність від виду вхідних даних	Не гарантує знаходження оптимального рішення
Метод мурашиної колонії	Наближений	$O(N)$	Висока швидкодія; Великі обсяги даних;	не гарантує знаходження оптимального рішення; складність реалізації
Метод гілок та границь	Точний	Залежить від вхідних даних	Можливе значне зменшення часу опрацювання;	Працює як метод повного перебору
Повний перебір	Точний	$O(2^N)$	Простота реалізації	Вхідні дані не великого об'єму; часова складність; В окремих випадках неможливо знайти рішення
Метод динамічного програмування	Точний	$O(N \cdot W)$	Незалежність від виду вхідних даних;	Висока часова складність;

### 3.5 Модифікація методу динамічного програмування для визначення активного складу вітрової електричної станції.

Особливістю застосування задачі пакування рюкзака для визначення активного складу вітрової електричної станції є те, що її розв'язок повинен містити такий набір предметів сумарна вага яких, має бути максимально близькою до

місткості рюкзака. Такий розв'язок отримати складно з методологічних і технічних причин. Використання методу динамічного програмування для розв'язання задачі пакування рюкзака при визначенні активного складу вітрової електричної станції зумовлює виникнення проблем із стовідсотковим забезпеченням навантаження споживачів, оскільки сумарна потужність ВЕС у більшості випадків буде меншою від навантаження споживачів [73, 75]. Різниця між навантаженням, яке необхідно забезпечити (далі навантаження) та потужністю активного складу ВЕС виражена у відсотковому еквіваленті, визначає відсоток недопакування.

В роботі досліджено два підходи для вирішення даних проблем:

1. Перший підхід полягає в збільшенні вхідного параметру “навантаження споживачів”, на експериментально встановлений відсоток. Для цього проводиться комп'ютерне симулювання роботи ВЕС.

На вхід на кожній ітерації подається значення навантаження і за допомогою методу динамічного програмування визначається набір ВЕУ, потужність ВЕС, а також середнє значення коефіцієнта недопакування.

На кожній наступній ітерації навантаження збільшується, на значення коефіцієнта недопакування отримане на попередній ітерації. Це можна відобразити таким чином:

$$P_{i+1} = P \cdot (1 + k_i) \quad , \quad (3.31)$$

де  $i \in [1; n]$ ,  $k$  – коефіцієнт недопакування  $i$ -ої ітерації,  $P$  – навантаження, яке необхідно забезпечити.

Недолік даного підходу полягає в тому, що оскільки коефіцієнт недопакування не є статичною величиною, а корелюється з багатьма параметрами, такими як: швидкість вітру, склад вітрової електричної станції та середня кількість активних ВЕУ. Використання даного підходу не дозволяє точно скоригувати необхідну потужність.

2. Другий підхід – модифікація алгоритму розв'язку задачі пакування рюкзака, яка полягає в зміні функції мети так, щоб враховувались проміжний коефіцієнт ефективності та відсоток недопакування [152].

Для цього формалізуємо задачу. Якщо дано  $N$  вітрових електроустановок,  $i$ -а має потужність  $P_i > 0$  та коефіцієнт ефективності  $C_i > 0$ , то необхідно вибрати такий набір ВЕУ, щоб:

$$\Delta P = \left[ \sum_{i=1}^N b_i P_i - P \right] \rightarrow \min \quad (3.32)$$

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^N b_i C_i}{\sum_{i=1}^N b_i} \rightarrow \max, \quad (3.33)$$

де  $\Delta P$  – відхилення потужності ВЕС від потужності навантаження,  $\bar{K}$  – проміжний коефіцієнт ефективності набору,  $P$  – потужність навантаження, яке необхідно забезпечити,  $C_i = \sum_{i=1}^n w_i \cdot k_i$  – ефективність окремої ВЕУ,  $k_i$  –  $i$ -тий критерій ефективності ВЕУ,  $w_i$  – ваговий коефіцієнт важливості  $i$ -ого критерію.

Метод динамічного програмування використовує адитивну або мультиплікативну функцію мети для оцінки вигоди, або функції які можна до них звести.

Використовуючи властивості логарифмів, мультиплікативну функцію можна перетворити в адитивну функцію, шляхом логарифмування її правої частини :

$$\ln \left( \prod_{i=1}^n f_i(x_i) \right) = \sum_{i=1}^n \ln(f_i(x_i)) \quad (3.34)$$

Для розв'язання завдання визначення набору вітрових електроустановок вводиться адитивна функція мети  $W$ , яка залежать від двох параметрів  $\Delta P, \bar{K}$  :

$$W(\Delta P, \bar{K}) = a_1 \bar{K} + a_2 (1 - \Delta P) \rightarrow \max \quad (3.35)$$

де,  $a_1, a_2$  – вагові коефіцієнти. Функція такого виду має діапазон значень  $(-\infty; 1]$ , що й зумовило її використання.

В такому випадку завдання визначення набору вітрових електроустановок вирішується застосуванням описаного рекурсивного алгоритму. Недоліком даного



підходу є велика кількість обчислень, тому для зменшення їх кількості використано мемоізацію, яка дозволить зменшити час роботи з  $O(N) = 2^N$  до  $O(N) = NP$ .

Мемоізація – це спеціальна оптимізаційна методика, яка дозволяє збільшити швидкість виконання програми, завдяки виключенню повторного обчислення, вже обрахованих значень [138, 167].

Для застосування даного оптимізаційного підходу необхідно дискретизувати ваги елементів з певною частотою, наприклад 1. Звідси випливає, що існує скінченна кількість різних оптимальних наборів, які можна записати в вигляді матриці розмірністю  $N$  на  $P$  та при потребі звертатися до них (рисунок 3.5). Позначимо ці набори як  $S(i, p)$ .

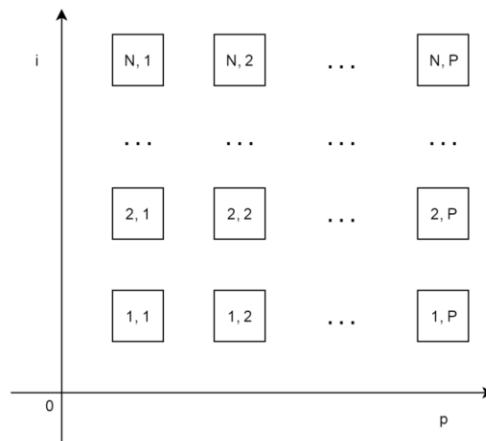


Рисунок – 3.5 Матриця оптимальних наборів.

Елементи матриці  $S(0, p)$  заповнюються нулями.

Елементи  $S(i, p)$  розраховуються на основі знайдених на попередніх кроках алгоритму елементів записаних в комірках  $S(i-1, p)$ ,  $S(i-1, \lfloor p - p_i \rfloor)$ ,  $S(i-1, \lceil p - p_i \rceil)$  Для цього, знаходиться значення функції мети, у випадку не включення  $i$ -тої ВЕУ  $S(i, p)$  (рисунок 3.6)

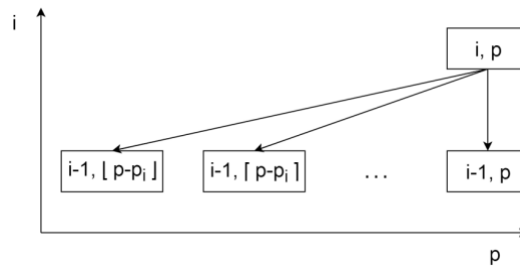


Рисунок – 3.6 Схеми розрахунку значень елементів матриці

У випадку включення  $i$ -тої вітрової електроустановки в набір, необхідно знайти набір потужністю  $p - p_i$ , тобто  $S(i-1, p - p_i)$ . Оскільки елементами матриці є значення функції мети тільки для цілих значень потужності, необхідно використати значення що максимально наближенні до необхідного, тобто  $S(i-1, \lfloor p - p_i \rfloor)$  і  $S(i-1, \lceil p - p_i \rceil)$  (рисунок 3.7):

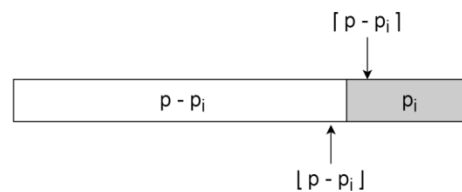


Рисунок – 3.7 Схематичне відображення включення  $i$ -го елемента у результуючий набір

У випадку, коли  $\lfloor p - p_i \rfloor = \lceil p - p_i \rceil$  розраховується тільки одне значення функції мети. Максимальне значення функції мети записується в  $S(i, p)$ . Таким чином заповнюються всі комірки.

Блок схема модифікації методу динамічного програмування для визначення активного складу вітрової електричної станції подана на рисунку 3.8:

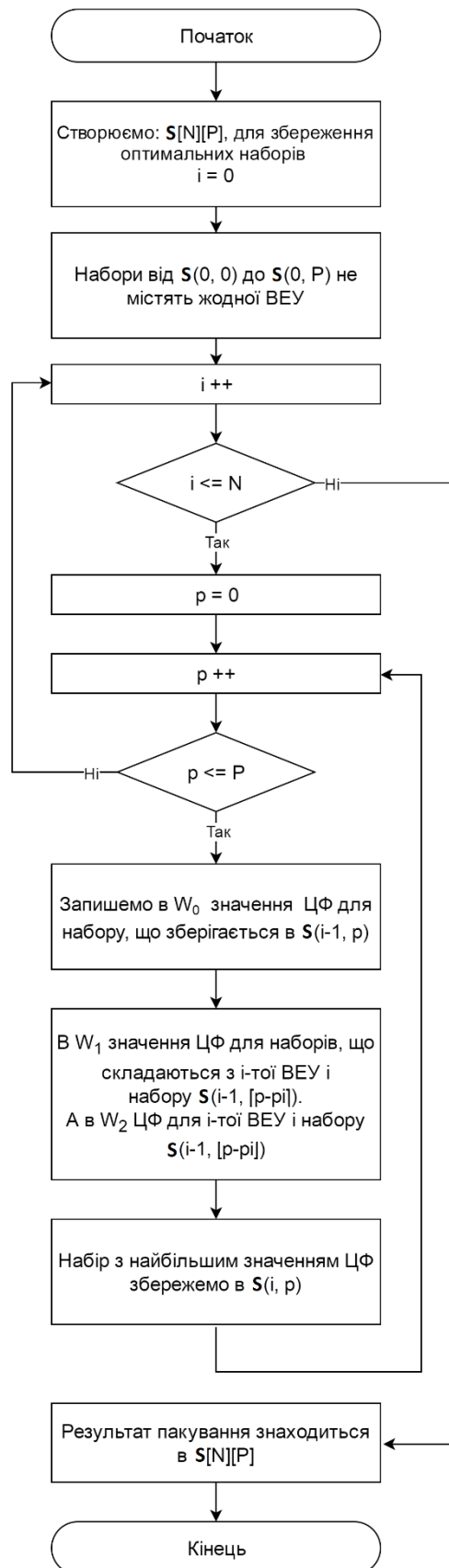


Рисунок – 3.8 Блок–схема модифікації алгоритму динамічного програмування для визначення активного складу вітрової електростанції

### 3.6 Структурна схема алгоритму управління вітровою електростанцією

Графічне представлення етапів функціонування системи управління вітровою електричною станцією подано на рисунку 3.9:

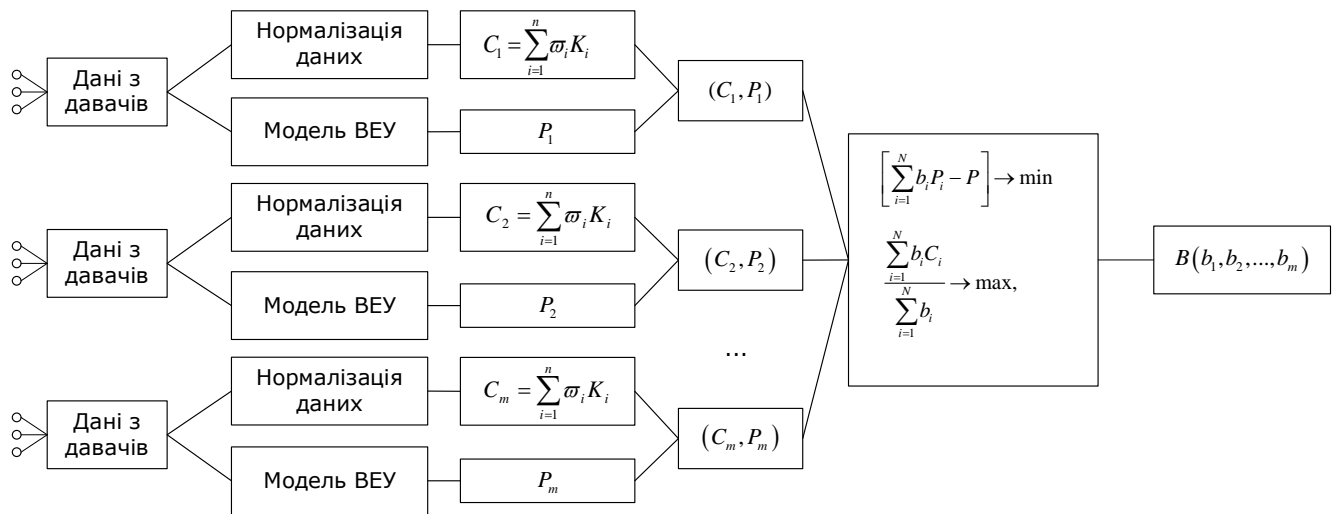


Рисунок – 3.9 Структура алгоритму визначення складу вітрової електростанції

В даній структурі застосовано модифікацію методу динамічного програмування для визначення активного складу вітрової електричної станції, яка дозволяє зменшити розкид виробленої потужності відносно навантаження споживачів та зменшити відсоток недопакування в періоди несприятливих погодних умов, а також підвищити середню ефективність ВЕС.

Як вже було зазначено вибір вітроенергетичних установок за декількома критеріями сприяє зростанню економічної і технічної ефективності їх використання. Результатом є:

- підвищення ефективності роботи вітрової електричної станції;
- зменшення кількості непланових ремонтів, шляхом своєчасного виявлення несправностей;
- покращення коефіцієнту використання енергії вітру;
- забезпечення рівномірного зношення окремих ВЕУ, що призводить до збільшення періоду їх експлуатації;

Розроблена модель може використовуватись при формуванні алгоритмів роботи системи управління вітровими електричними станціями.

### 3.7 Дослідження роботи алгоритмів системи управління вітровою електричною станцією

Для верифікації досліджуваних алгоритмів, проведено комп'ютерне симулювання роботи системи управління вітровою електричною станцією, з використанням кожного з методів, а саме:

- класичного методу динамічного програмування (далі Метод 1);
- методу динамічного програмування з підвищенням вхідного параметру “навантаження” на експериментально встановлений відсоток (далі Метод 2);
- модифікації методу динамічного програмування (далі Метод 3).

Сформовано тестовий набір з 500 значень навантаження в інтервалі [5000; 15000] кВт. Досліджувалися режими роботи вітрової електричної станції, яка складається з 45 ВЕУ. Основні характеристики ВЕУ наведено у таблиці 3.2.

Аналогічно, сформовано тестовий набір з 500 значень швидкості вітру в інтервалі [5; 15] м/с.

**Таблиця 3.2**

Основні характеристики вітроенергетичних установок ВЕС

Типи ВЕУ	USW-56-100	ENERCON-33	ENERCON -53
Кількість ВЕУ	15	10	20
Потужність ротора, кВт	107,5	330	800
Діаметр ротора, м	17	33	53
Стартова робоча швидкість, м/с	5	3	3
Номінальна швидкість вітру, м/с	13	11,5	12
Максимальна робоча швидкість м/с	22	25	34

Отримані результати використано при формуванні бази даних, на основі якої проведено статистичний аналіз. Результати аналізу подані в таблиці. 3.3

Таблиця 3.3

## Результати досліджень

Назва алгоритму	Динамічне програмування	ДП з підвищенням навантаження на експериментально встановлений відсоток	Модифікація методу ДП
Було проведено пакувань	500	500	500
Затрачено часу (с)	1237	1297	1443
Розкид відхилень( кВт.)	[-964; -9,17]	[-660,52; 292,28]	[-66,59; 111,53]
Середнє значення коефіцієнта ефективності набору (%)	0,5418	0,5417	0,6127
Максимальне відхилення (%)	-3,09801	-2,26	0,385
Середнє арифметичне відхилення (кВт)	301.3613	-6,012	13,99
Дисперсія	136402,30	45979,5738	1914,15
Середнє квадратичне відхилення (кВт)	369,33	214,43	43,75
Квадратичний коефіцієнт варіації (%)	1,231	0,715	0,146
Швидкість роботи алгоритму (с.)	2,475	2,594	2,886
Максимальне відхилення (%)	-3,386	-2,071	-0,23
Середнє відхилення відносно потужності найменшого ВЕУ (%)	-203,403	-5,937	9,192
Середнє відхилення відносно потужності найбільшого ВЕУ (%)	-21,006	-0,613	0,95
Середнє відхилення ВЕС (%)	-1,005	-0,017	0,046

В результаті роботи Методу 1 відсоток недопакування, складає -1,005 %. Застосування Методу 2 для розв'язання задачі пакування рюкзака при визначенні активного складу ВЕС забезпечує зменшення відсотку недопакування, проте збільшує діапазон розкиду відхилень.

З таблиці 3.3 видно, що Метод 3 дає змогу зменшити середнє відхилення розв'язку відносно найбільшої потужності ВЕУ з -21% недопакування, отриманого Методом 1 до 0,95% перепакування. Середнє відхилення миттєвої потужності ВЕС залежить від кількості типів ВЕУ, технічного стану окремих ВЕУ, номінальної

потужності ВЕУ, швидкості вітру, різниці потужностей різних типів ВЕУ та загальної кількості ВЕУ вітропарку.

На рисунках 3.10 – 3.12 відображено динаміку результатів розв’язання задачі пакування рюкзака трьома досліджуваними методами:

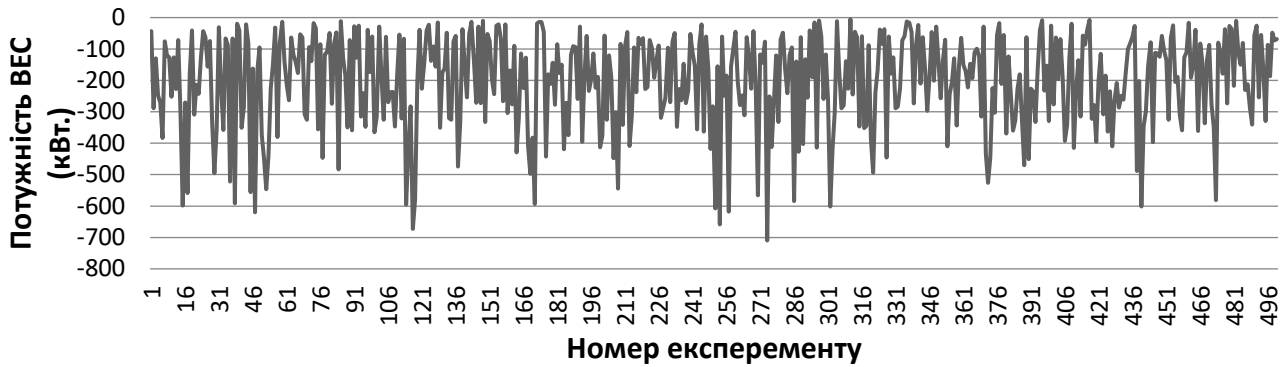


Рисунок – 3.10 Розподіл відхилень для класичного методу динамічного програмування



Рисунок – 3.11 Розподіл відхилень для методу динамічного програмування з підвищенням навантаження на експериментально встановлений відсоток

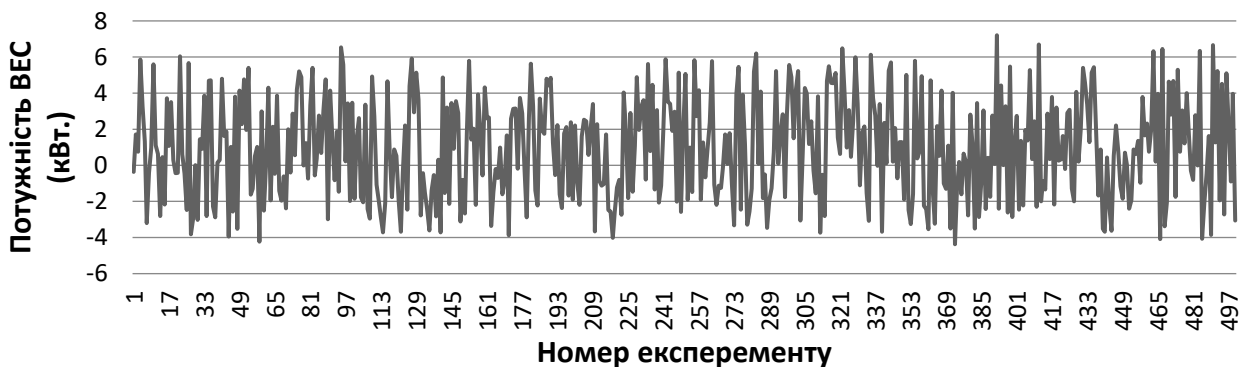


Рисунок – 3.12 Розподіл відхилень для модифікації методу динамічного програмування для визначення активного складу вітрової електричної станції

Таблиця 3.4

## Максимальні відхилення досліджуваних методів

Показник \ Метод	Метод 1	Метод 2	Метод 3
Максимальне відхилення Метод 1, %	-3,098	0,463	0,202
Максимальне відхилення Метод 2, %	-2,07	-2,07	0,069
Максимальне відхилення Метод 3, %	-0,47	-0,476	-0,232

З таблиці 3.4 видно, що максимальний відсоток недопакування при розв'язанні задачі Методом 1 складає -3,098% , що рівне -964 кВт. При цьому, за ідентичних умов, результат отриманий Методом 2 складає 0,463% перепакування, або 144,04 кВт, а результат отриманий Методом 3 дорівнює 0,202% перепакування, та рівний 62,89 кВт. Максимальний відсоток недопакування для Методу 2 дорівнює -2,07% що еквівалентно, -660,52 кВт. За ідентичних умов результат отриманий Методом 1 дорівнює -2,07% що еквівалентно -660,52 кВт., а результат отриманий Методом 3 дорівнює 0,069%, що еквівалентно 22,08 кВт перепакування. Максимальний відсоток недопакування для Методу 3 дорівнює -0,232% що еквівалентно -66,59 кВт. За ідентичних умов, результат отриманий Методом 2 складає -0,476% недопакування, або -136,65кВт , результат отриманий Методом 1 дорівнює -0,470% недопакування, що еквівалентно -134,65кВт.

На основі аналізу отриманих результатів обґрунтовано ефективність використання модифікації методу динамічного програмування для визначення активного складу ВЕС, оскільки даний метод дає змогу мінімізувати відхилення сукупної потужності ВЕС від навантаження споживачів та одночасно максимізувати ефективність вітропарку.

Динаміку відхилення потужності від навантаження споживачів, при розв'язанні задачі пакування рюкзака за допомогою трьох досліджуваних методів подано на рисунку 3.13:



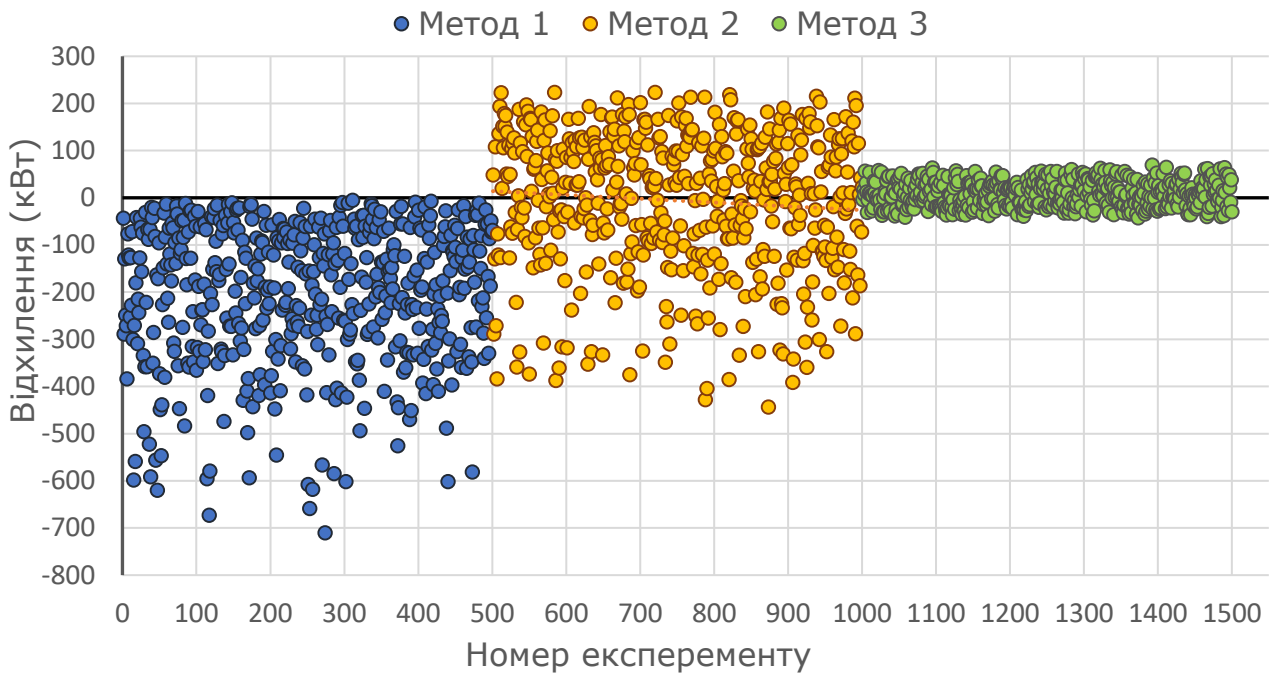


Рисунок – 3.13 Розподіл відхилень потужності генерації від потужності споживання

В результаті досліджень трьох описаних методів середнє відхилення потужності вітропарку від навантаження для Методу 3 становить 0,046%, проти 1,005 % визначеного для Методу 1 та -0,017 % для Методу 2.

Важливою перевагою застосування Методу 2 та Методу 3 є можливість їх використання для визначення активного складу вітрової електричної станції з енергоакумулюючим елементом в складі, оскільки за певних умов дані методи забезпечують вибір активного складу, який здатний генерувати надлишок електричної енергії. Надлишкова енергія отримана таким способом, може бути закумуляована в АБ, та використана в періоди несприятливих погодних умов чи максимального навантаження споживачів.

Використання енергоакумулюючого елемента в структурі вітрової електричної станції покликане зменшити кількість перевизначень активного складу, тобто кількість змін стану вітроенергетичних установок. Оскільки зупинка окремих ВЕУ, та введення їх у дію є достатньо трудомістким та енергозатратним процесом, важливим є забезпечення графіка електричного навантаження у повному обсязі, з мінімальною кількістю переключень активних установок.

Результуючі дані статистичного аналізу швидкості вітру, а саме ймовірність повторення конкретної швидкості вітру, вітровий енергетичний потенціал, можуть бути використанні при обґрунтуванні структури вітрової електричної станції з використанням енергоакумулюючого елемента, як частина вхідних даних при аналізі природніх факторів, які мають вплив на географічну місцевість, в якій планується встановлення ВЕС, в сукупності з електричним навантаженням споживачів, яке заплановано перекласти на станцію в майбутньому. Вони також дають змогу певною мірою обґрунтувати енергетичну ємність енергоакумулюючого елемента, з метою забезпечення графіка електричного навантаження.

З іншої сторони, оскільки на даний час, вартість енергоакумулюючих елементів є високою, тому вона повинна бути обґрунтована не лише технічно, а й економічно. Актуальним постає завдання обґрунтованого вибору ємності енергоакумулюючого елемента, яка буде оптимальною, за параметрами ефективність та вартість, забезпечувати зрівноваженість між максимальним забезпеченням потреб навантаження та вартістю його встановлення і експлуатації.

### **Висновки до Розділу 3**

На основі аналізу отриманих результатів обґрунтовано ефективність використання удосконаленого методу динамічного програмування для визначення активного складу ВЕС, оскільки даний метод дає змогу мінімізувати відхилення сукупної потужності ВЕС від навантаження споживачів та одночасно максимізувати ефективність вітропарку. Отримані результати використано при проектуванні систем управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції.

Розроблено метод визначення активного складу вітрової електричної станції, який ґрунтується на модифікації методу динамічного програмування, використовує експертні оцінки параметрів, узагальнений критерій ефективності вітрової

електроустановки, доступну енергетичну ємність акумулюючого елемента та забезпечує можливість приймати рішення в режимі реального часу.

Розроблений метод доцільно використати при проектуванні інтелектуального блоку управління вітровою електричною станцією, який забезпечить визначення активного складу вітрової електричної станції, використовує інтелектуальну систему побудовану на продукційних правилах, для формування адитивних порад диспетчеру, щодо управління перетоками енергії, для забезпечення навантаження споживачів, ефективного використання енергоакумулюючого елемента та ефективного функціонування вітрової електричної станції та забезпечує відображення отриманих результатів у інтуїтивно зрозумілому вигляді.

## **4. РОЗРОБЛЕННЯ ЗАСОБІВ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОДИНАМІЧНИМИ РЕЖИМАМИ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

У даному розділі розроблено засоби інтелектуалізації автоматизованої системи управління вітровою електричною станцією, які забезпечують функціонування системи підтримки прийняття рішення диспетчером при управлінні енергодинамічними процесам. Розроблена інформаційна система управління побудована з використанням сучасних принципів проектування програмних застосунків: наслідування, інкапсуляції логіки, використання сучасних шаблонів проектування та фреймворків.

### **4.1 Обґрунтування засобів для інтелектуалізації системи управління**

#### **Середовище розробки Eclipse.**

Eclipse є вільним модульним, інтегрованим середовищем розробки програмного забезпечення. Розробляється та підтримується компанією Eclipse Foundation, використовується для розробки застосунків на мовах Java, C++, Python, PHP, Ruby, R, Clojure та ін., які підключаються за допомогою різних плагінів. Середовище розробки включає також Eclipse JDT для Java. Випущений на умовах Eclipse Public License, Eclipse, та є вільним програмним забезпеченням.

Eclipse – це фреймворк для розробки модульних кросплатформених застосунків із низкою особливостей, таких як: можливість розробки програмного забезпечення на багатьох мовах програмування (рідною є Java); кросплатформенність; модульність, призначена для подальшого розширення незалежними розробниками; відкритість вихідного коду; підтримка фондом Eclipse, куди входять IBM, Oracle, Borland. Eclipse, це насамперед повноцінна Java IDE, націлена на групову розробку, яка забезпечує зручну роботу з системами контролю версій (підтримка CVS, активно розвиваються кілька варіантів SVN модулів, а також підтримка VSS та інших), у багатьох організаціях вважається корпоративним стандартом для розробки ПЗ на Java. Eclipse написана на Java, тому є платформи незалежним продуктом, окрім бібліотеки SWT (Standard Widget

Toolkit), яку розробляють окремо для більшості поширених платформ. Бібліотека SWT використовує графічні засоби операційної системи, що забезпечує нативний зовнішній вигляд інтерфейсу користувача та підвищує швидкість розробки.

### **Шаблон проектування MVC**

Модель–Представлення–Контролер (або Model-View-Controller, MVC) – це архітектурний шаблон, який застосовується для проектування та розробки програмного забезпечення [126, 190]. Даний шаблон проектування забезпечує розділення системи на три взаємопов'язані частини: модель даних, вигляд (представлення) та модуль взаємодії [139]. Використовується для відокремлення моделі даних від представлення, таким чином, щоб зміни в моделі даних відбувалися без змін інтерфейсу користувача, а зміни інтерфейсу користувача мали мінімальний вплив на роботу з даними. Метою даного шаблону є створення гнучкого дизайну програмного забезпечення, який буде забезпечувати зручність при розширенні програм чи внесенні будь-яких подальших змін, а також давати можливість повторного використання окремих компонентів системи. Застосування шаблону MVC у великих системах забезпечує можливість структурувати код, зробити його більш зрозумілим та простим. Шаблон MVC ділиться на три компоненти (рисунок 4.1):

- Компонент Модель (Model) відповідає за збереження даних та забезпечення інтерфейсу доступу до них, є центральним компонентом шаблону MVC та відображає незалежну від інтерфейсу користувача поведінку застосунку.

- Вигляд (View) відповідає за представлення даних користувачеві. Це може бути інформація у будь-якому вигляді, одержана на виході (наприклад текст, графік, зображення, діаграма). При цьому для інформації можуть одночасно співіснувати декілька представлень, наприклад в табличному та графічному виді.

- Контролер (Controller) забезпечує взаємодію з компонентами, отримує сигнали у вигляді реакції на дії користувача та передає дані у Model або View. У його функції входить відстеження подій, які виникають в результаті дій користувача. Controller одержує вхідні дані та перетворює їх на команди для моделі чи представлення.

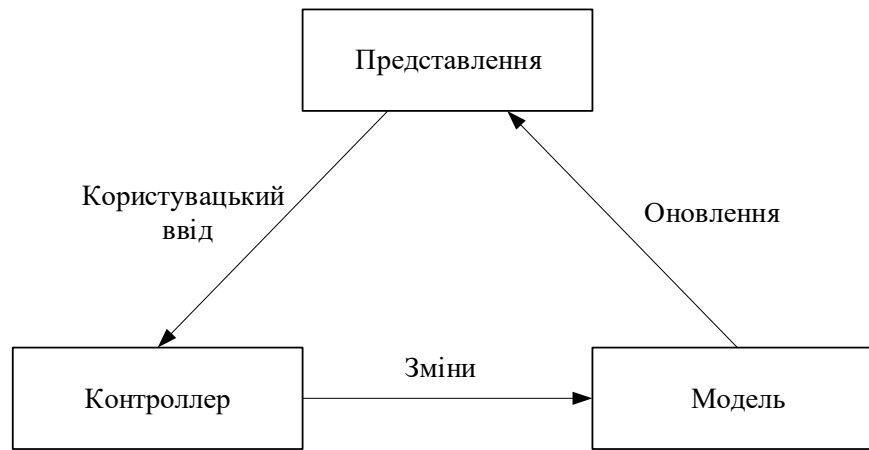


Рисунок – 4.1 Взаємодія ключових частин MVC

*Клас моделі (Model).* Модель дає контролеру представлення даних, які запросив користувач. Модель даних є завжди однаковою, незалежно від типу представлення цих даних користувачеві. Даний компонент містить бізнес логіку роботи застосунку (логіку вирішення основних завдань) та відповідає за збереження, видалення, оновлення даних програмного застосунку. Дані дії реалізуються через операції з базою даних чи виклик зовнішніх веб-сервісів. Модель інкапсулює ядро даних і основний функціонал їхнього опрацювання та не залежить від процесу вводу та виводу даних. Абсолютно вся логіка додатку повинна бути сконцентрована в моделі. Реалізація будь-якої частини бізнес-логіки в контролері або представленні не допускається.

*Клас представлення (View)* відповідає за визначення структури та відображення даних користувачу на екрані. Представлення відповідає за отримання необхідних даних з моделі та відправку їх користувачеві, без опрацювання [109]. Впливає на стан моделі за допомогою надсилання їй повідомлень.

*Клас контролера (Controller).* Першим з трьох компонентів шаблону отримує клієнтський запит, розбирає його на елементи та ініціалізує об'єкти моделі. Після обробки даних моделлю, він отримує її відповідь та відправляє результат на рівень представлення. Контролер дозволяє структурувати код шляхом групування зв'язаних дій в окремі класи. Наприклад у типовому MVC-проекті може бути користувацький контролер, який містить групу методів, які відповідають за

управління обліковим записом користувача, такі як реєстрація, авторизація, редагування профілю, зміна пароля тощо. Зареєстровані події відправляються компонентам моделі або компонентам, які відповідають за відображення даних. Розмежування моделі та представлення даних дає змогу незалежно застосовувати різні компоненти для відображення інформації. Як результат, якщо користувач через контролер, вносить зміни в модель даних, то інформація надана одним або декількома візуальними компонентами, буде автоматично оновлена у відповідності до змін.

Застосування шаблону проектування MVC надає такі переваги:

- Підтримка декількох представлень. Оскільки представлення є відокремленим від моделі та немає прямої залежності між моделлю та представленням, користувальницький інтерфейс може відображати декілька представлень одних і тих же даних одночасно.

- Пристосування до змін. Вимоги до інтерфейсу користувача, як правило змінюються частіше ніж бізнес правила. Тому, оскільки модель прямо не залежить від представлення, додавання нових типів представлень в систему не впливає на модель. Як наслідок, обсяг всіх змін обмежується лише представленням.

- Розширюваність. Шаблон MVC вводить нові рівні опосередкованості і тому трохи підвищує складність рішення, проте забезпечує зручну розширюваність системи та можливість повторного використання коду.

- Вартість частих оновлень. Грамотне використання шаблону MVC забезпечує зручне оновлення компонентів системи, оскільки при правильному проектуванні компоненти є незалежними та можуть бути легко змінені та доповнені в майбутньому. Структурованість коду, також дає змогу зменшити затрати розробку.

Для мови програмування Java парадигма MVC підтримується на рівні стандартних бібліотек. Як результат, програміст отримує в своє розпорядження потужну компонентну структуру в якій функції чітко розмежовані, що гарантує надійність та розширюваність системи, яка розробляється.

## **Бібліотека (фреймворк) SPRING.**

Spring Framework це універсальний фреймворк із відкритим вихідним кодом для Java-платформи, який надає розробникам легкі у використанні та добре задокументовані засоби для вирішення проблем, що виникають при створенні прикладних програм. Для бібліотеки Spring розроблено безліч розширень та модулів для створення веб-застосунків на Java Enterprise платформі, тому він позиціонується в розробників як стратегічно важливий фреймворк та користується великою популярністю. Spring забезпечує вирішення всього спектру завдань при створенні інформаційних систем, заснованих на платформі Java. Він не є повністю зв'язаний з платформою Java Enterprise, незважаючи на його масштабну інтеграцію з нею, що є важливою причиною його популярності [159].

Spring framework містить велику кількість розширень (features), необхідних для ефективної розробки великих бізнес-додатків, без застосування складних програмних моделей. Він забезпечує послідовну модель розробки, яка застосовується для більшості типів додатків, які вже створені на основі платформи Java. Spring має власну MVC-платформу, розроблену з врахуванням недоліків Apache Struts, а також інших доступних веб-фреймворків та забезпечує достатній розподіл між компонентами представлення та контролер, а також між компонентами контролер та модель [109].

Клас DispatcherServlet є основним контролером бібліотеки та відповідає за передачу, за допомогою різних інтерфейсів, керування на всіх етапах виконання HTTP-запиту.

Spring MVC - орієнтований на запити фреймворк, який визначає інтерфейси для всіх стратегічних функцій сучасної запито-орієнтованої системи. Інтерфейси застосовуються з метою забезпечення зрозумілості та простоти реалізації. Всі інтерфейси тісно пов'язані з Servlet API. Цей зв'язок в окремих випадках розглядається, як нездатність запропонувати для веб-додатків абстракцію більш високого рівня, однак він дає змогу використовувати особливості Servlet API, полегшуючи роботу з ним. MVC прокладає шлях до більш чистого frontend-коду.



До найбільш важливих інтерфейсів Spring MVC відносять:

- **HandlerMapping**: визначає який контролер необхідно викликати, та надсилає запит у відповідний контролер.
- **HandlerAdapter**: реалізує виклик та виконання методу обробника обраного **HandlerMapping**.
- **Controller**: керує процесом перетворення вхідних запитів в адекватні відповіді. Займається транспортуванням даних з моделі в представлення та навпаки.
- **View**: відповідальний за повернення відповіді клієнту у вигляді тексту, зображень. Частина запитів може бути направлена напряму у **View**, без використання **Model**, інші проходять через всі три компоненти.
- **ViewResolver**: визначає, який **View** повинен бути відображений клієнту.
- **HandlerInterceptor**: реалізує перехоплення вхідних запитів. Схожий по функціоналу, але не еквівалентний сервлет-фільтрам.
- **LocaleResolver**: реалізує отримання та збереження локальних налаштувань користувача.
- **MultipartResolver**: забезпечує завантаження на сервер локальних файлів клієнта.

Spring MVC надає розробнику наступні можливості:

- Чіткий та прозорий поділ між компонентами в MVC та запитах.
- Стратегія інтерфейсів - кожен інтерфейс робить тільки свою частину роботи.
- Інтерфейс завжди може бути замінений альтернативною реалізацією.
- Інтерфейси тісно пов'язані з Servlet API.
- Високий рівень абстракції для веб-додатків.

Отже, в результаті дослідження обґрунтовано використання Eclipse, як середовище для створення програмного продукту; мову програмування Java та платформу розроблення SWT; шаблон проектування MVC для організації архітектури додатку і бібліотеку Spring для проектування додатку.

На рисунку 4.2 подано співвідношення між обраними шаблонами, середовищем та технологіями:

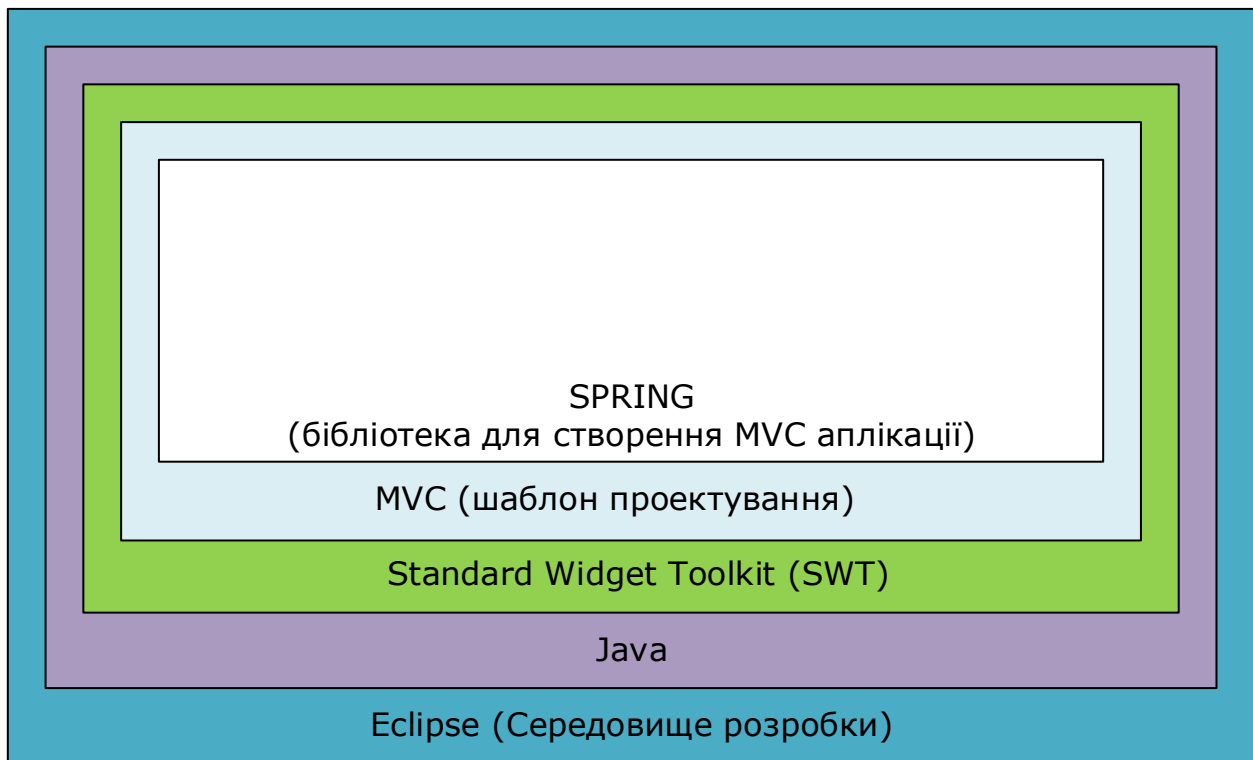


Рисунок – 4.2 Засоби розроблення системи підтримки прийняття рішення

### Сторонні бібліотеки

Бібліотека JFreeChart — відкрита бібліотека для мови програмування Java, яка полегшує створення різноманітних складних діаграм. В ній реалізовані механізми збільшення/зменшення, обробки подій, створення декількох діаграм в одній видимій області, зміни вигляду кривих, підказки текстом та інші можливості. JFreeChart підтримує різноманітні типи діаграм: кругові діаграми, гістограми, діаграми часових рядів, лінійні графіки, графіки Гранта, комбіновані гістограми, графіки різниці, покрокові діаграми, комбіновані діаграми. Для їх побудови необхідно сформувати набір даних (dataset), далі створити екземпляр об'єкту JFree, та додати діаграму в будь-який графічний компонент. Дана бібліотека широко використовується в Java застосунках, та має ряд переваг:

- вона повністю безкоштовна, з відкритим вихідним кодом, що забезпечує можливість її використання для будь яких цілей без будь-яких витрат;

- поставляється з добре документованим API, тому є легкою у використанні;
- підтримує широкий спектр найрізноманітніших типів 2D та 3D діаграм;
- легко розширюється та може бути використана, як на стороні клієнта, так і на стороні сервера;
- підтримує декілька форматів виводу, основними серед яких є PNG, JPEG, PDF, SVG;
- забезпечує розширені налаштування діаграм.

Базова схема інтеграції JFreeChart в Java застосунок відображена на рисунку

4.3:

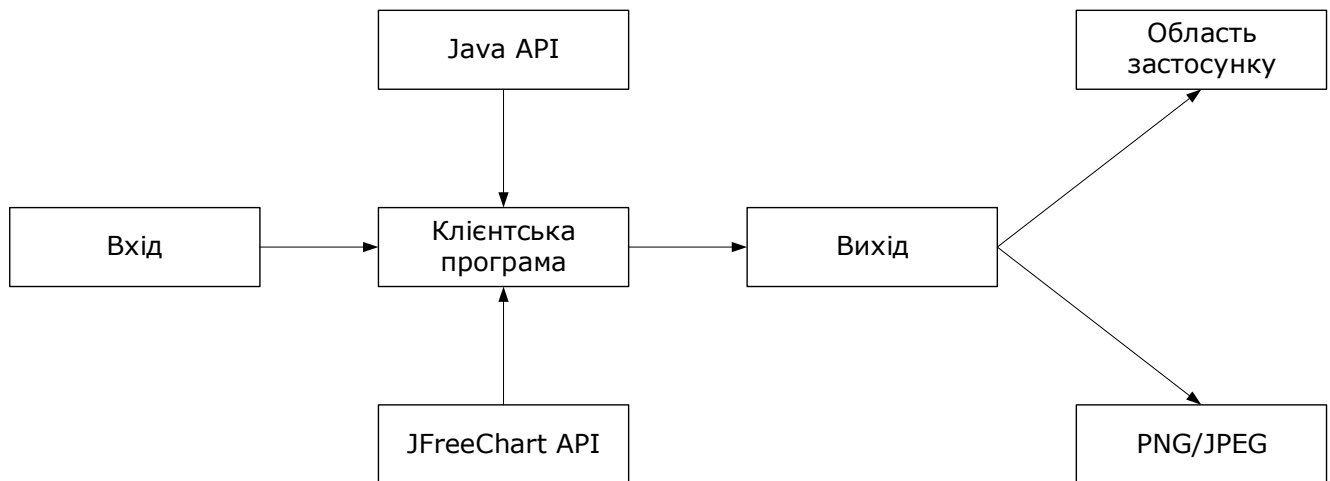


Рисунок – 4.3 Базова схема інтеграції JFreeChart в програмний продукт

Програма-клієнт приймає призначені для користувача дані, далі застосовуються стандартні інтерфейси програмування Java і JFreeChart, засновані на вимогах для генерації вихідних даних у вигляді кадру, формується вихід, який може бути відображений безпосередньо всередині програми чи незалежно в такі формати, як JPEG або PNG.

#### 4.2 Загальна характеристика системи підтримки прийняття рішень

При створенні системи підтримки прийняття рішень застосовано шаблон проектування MVC (Model-View-Controller), який забезпечує відокремлення даних (моделі) від інтерфейсу користувача. Такий підхід є достатньо зручним, оскільки дає змогу змінювати їх незалежно один від одного. Даний шаблон проектування має ряд переваг, серед яких слід відзначити: легку розширюваність коду, що

забезпечує зручність підтримки таких проектів, чітке розділення між компонентами, та структурованість коду, що суттєво зменшує складність великих проектів [41].

Оскільки графік електричного навантаження є визначеним заздалегідь (окрім нештатних ситуацій), диспетчер має можливість заздалегідь визначити момент перерахунку активного складу вітрової електричної станції. На практиці застосовуються два методи регулярного перерахунку складу: *рівномірний*, який здійснюється визначену кількість разів протягом доби та *фазовий*, який здійснюється з врахуванням моменту зміни заданого рівня потужності на визначену  $\Delta$ . При використанні будь-якого з цих способів існує ймовірність незадоволення графіка електричного навантаження. Для вирішення даної проблеми важливим завданням є компенсування пікових значень потужності вітрової електричної станції (максимальної та мінімальної), яке частково досягається врахуванням динаміки швидкості вітру та використанням енергоакumuлюючого елемента в складі ВЕС. Важливою особливістю будь якої системи підтримки прийняття рішень в якій в основі лежить аналіз енергодинамічних процесів, має бути можливість миттєвого перерахунку активного складу, тому для створення такої системи необхідно використати розроблені алгоритми, які здійснюють обчислення з мінімальною затримкою, тобто є непомітними для диспетчера (користувача).

Для забезпечення інтелектуалізації збору та опрацювання даних та диспетчерського управління, необхідною умовою є автоматизація процесів з використанням SCADA – систем (Supervisory Control And Data Acquisition) [128, 129, 147]. Будь-які сучасні SCADA–системи є відкритими (сумісні з стандартом OPC [148], ActiveX, COM, DLL, містять вбудовані алгоритмічні мови програмування (Visual C++, Visual Basic, Java і інші), та забезпечують можливість інтеграції з іншими відкритими системами, а також модульність – можливість замінити частину системи (модуль) аналогічними модулями іншого виробника.

Система підтримки прийняття рішень розроблена з використанням OPC UA стандарту є окремою бібліотекою, та може бути інтегрована у сучасні SCADA – системи [155, 157, 158, 170]. Одна з найважливіших переваг розробленої системи – програмна сумісність з іншими програмними продуктами. Слід відзначити, що підтримка в деяких SCADA–системах інтеграції ActiveX і COM об’єктів третіх виробників, дає змогу інтегрувати розроблену СППР і тим самим адаптувати SCADA з апаратурою, яка не підтримує стандарт OPC.

#### **4.2.1 Архітектура СППР**

Архітектура програмного забезпечення – це набір внутрішніх структур ПЗ, які складаються з компонентів, опису зв’язків та можливих взаємодій між ними, а також властивостей компонентів, які доступні ззовні [12]. Архітектура повинна визначати внутрішню структуру системи, задаючи спосіб її організації та побудови.

Компонент програмного забезпечення - це елемент довільної структури, який можна виділити, через інтерфейс взаємодії між цим компонентом та іншими, які його оточують. При розробці програмного забезпечення, компонент має більш вузьке значення - це найменша частина системи, яку можна включити в або виключити з її складу [11, 16].

Архітектура програмного забезпечення поділяється на декілька видів. Найпоширенішими видами архітектури ПЗ є: функціональний/логічний вид, вид код/модуль, вид розробка/структурний, вид паралельності виконання/процес/потік, фізичний вид/вид розгортання, вид з точки зору дій користувача, вид з точки зору даних [96].

Дизайн (як результат діяльності з проектування) повинен описувати архітектуру програмного забезпечення, тобто представляти декомпозицію системи у вигляді організованої структури компонентів та інтерфейсів між компонентами. Найважливішою характеристикою готовності дизайну є той рівень деталізації компонентів, який дозволяє їх сконструювати. Отже, дизайн системи – комплекс архітектурних представлень, достатній для реалізації системи і задоволення вимог, які ставляться до системи [91, 116, 125, 139].

На рисунку 4.4 подана узагальнена структура системи підтримки прийняття рішення:

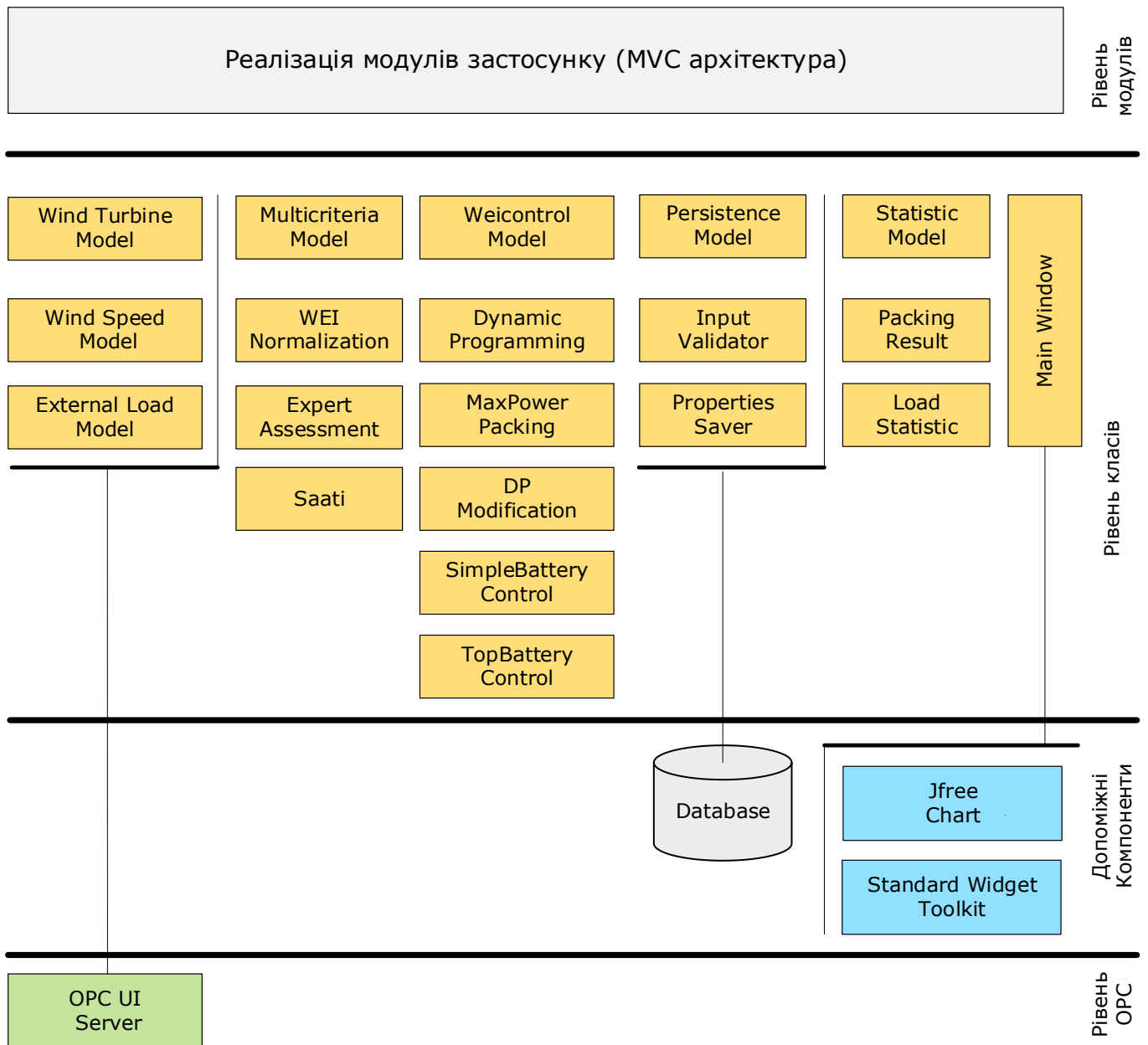


Рисунок – 4.4 Узагальнена структура системи підтримки прийняття рішення

З рисунку 4.4, видно, що розроблена система підтримки прийняття рішення складається з чотирьох основних рівнів.

Верхній рівень (*рівень аплікації*) – це рівень реалізації шаблону MVC, який містить: модель, тобто фундаментальні дані, які необхідні для роботи; представлення (View) - графічний інтерфейс, тобто графічні сторінки, користувацькі компоненти, стилі графічних елементів; контролер (Controller) –

здійснює взаємодію з користувачем, роботу з моделлю, а також визначення представлення, яке відображає призначений для користувача інтерфейс. У реалізації MVC контролер обробляє дані, що вводяться і відповідає на дії користувача. Даний рівень також містить всі динамічні бібліотеки (dll – dynamic link library) і класи *Spring*, папки і файли модулів системи, абстрактні класи та інтерфейси. Слід зазначити, що системи розроблені з використанням MVC є дуже зручними для написання тестів до розробленого програмного коду.

*Рівень класів* містить бібліотеку класів програмного продукту, у яких реалізовані всі необхідні методи у вигляді алгоритмів, що здійснюють основні обчислення у програмному продукті. Даний рівень складається з таких класів: *Wind Speed Model*, *Wind Turbine Model*, *External Load Model*, та *Battery Model*. Вони відповідають за роботу OPC UA – сервером (за отримання / передачу даних від / до OPC UA – сервера). Дані класи формують вхід систем, який складається з таких основних параметрів: швидкість вітру в даний момент часу; навантаження споживачів; множина ВЕУ, причому кожна вітроустановка характеризується своєю внутрішньою структурою динамічних параметрів (множина параметрів ВЕУ), та енергоакумуляційний елемент, який характеризується своєю внутрішньою структурою. Слід зазначити, що вхідні дані можуть бути отримані безпосередньо з контролерів чи за допомогою режиму симуляції OPC-сервера.

Оскільки система розроблена з використанням шаблону MVC, її реалізація розбита на три основні компоненти: View, Model та Controller, кожний з яких складається з набору класів. View містить класи, які відповідають за відображення інформації користувачеві а також за базові функції інтерфейсу, такі як перемикання вкладок, відображення графіків та інше. Основним класом Представлення є MainWindow, в ньому описані основні елементи інтерфейсу, такі як вікна та сторінки програмного продукту.

Контролер містить класи, основне завдання яких, це здійснення двостороннього зв'язку між View та Model, оновлення моделі до актуальних даних,

валідація вхідних даних, збереження інформації в БД та вивантаження інформації з бази даних.

Клас *Persistence* реалізує методи для роботи з базою даних. Зберігання інформації про поточний стан вітрової електричної установки, енергоакумуляуючого елемента, вироблену потужність, навантаження, швидкість вітру та інші важливі параметри системи. Містить два допоміжні класи *InputValidator* та *PropertiesSaver*.

Клас *InputValidator*, який забезпечує валідацію вхідних даних.

Клас *PropertiesSaver*, який забезпечує зберігання значень параметрів в таблиці в БД.

Клас *Statistics* реалізує методи запису та пошуку статистичних даних роботи системи. Для забезпечення гнучкості системи і для винесення коду, що здійснює збір статистики було використано аспектно-орієнтовану парадигму програмування (АОП). Збір статистики здійснює метод *around*, зберігає всю необхідну інформацію, а саме результати методу визначення активного складу ВЕС (результати пакування), відсоток недопакування, набір активних ВЕУ, заряд батареї на момент пакування та інші параметри.

В Моделі зберігаються класи, які реалізують бізнес логіку програмного продукту.

Пакет *MulticriteriaModel* реалізує класи визначення оцінки ефективності вітрової електроустановки.

Методи класу *WEINormalization* реалізують алгоритм нормалізації параметрів до інтервалу  $[\alpha, \beta]$  за такими співвідношенням (4.1):

$$\bar{K}_i = \frac{K_i - K_i^-}{K_i^+ - K_i^-}(\beta - \alpha) + \alpha \quad (4.1)$$

$$\text{де } K_i^+ = \max K_i ; K_i^- = \min K_i ; K_i^+ \neq K_i^-, i = \overline{1, n}$$

*Saaty* – клас, який інкапсулює всі необхідні алгоритми для визначення вагових коефіцієнтів важливості критеріїв. Оскільки визначення вагових коефіцієнтів важливості базується на створенні експертної матриці попарних порівнянь важливості кожного критерію, існує необхідність забезпечення



можливості зміни важливості окремих критеріїв. Це може відбуватися внаслідок змін конкретних правил, які існують на ВЕС, наприклад зміни пріоритетного напрямку роботи вітрової електричної станції, зміни вимог до забезпечення графіку електричного навантаження чи зміни нормативної бази регіону і ін. Визначення вагові коефіцієнтів важливості реалізовано за допомогою повного методу Сааті [90, 172, 183]. Даний алгоритм складається з такої послідовності дій (кроків):

- 1) На першому кроці зчитується квадратна матриця  $A$ , яка заповнюється експертами;
- 2) Для складеної матриці знаходиться власне значення за умови  $Aw = \lambda w$  при  $w \neq 0$ , яке підставляється в однорідну систему, в результаті чого отримується матриця  $A'$ ;
- 3) На даному етапі розв'язується система рівнянь при цьому одне з них необхідно замінити умовою нормування;
- 4) В результаті чого формується вектор вагових коефіцієнтів важливості  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ .

*ExpertAssessments* – клас, в якому реалізовано алгоритм обчислення інтегральної оцінки ВЕУ. За замовчуванням, для розрахунку інтегральної оцінки використовується адитивний підхід (4.2):

$$C_{\Sigma} = w_1 K_1 + w_2 K_2 + \dots + w_n K_n \quad (4.2)$$

Також, в даному класі реалізовано інші методи, які обчислюють інтегральну оцінку:

використовуючи мультиплікативний підхід 4.3 (множення оцінок критеріїв і вагових коефіцієнтів):

$$C_{\Pi} = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n \quad (4.3)$$

середньо степеневий підхід (поділ результату адитивного підходу на кількість критеріїв у системі 4.4):

$$C = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i K_i \right) \quad (4.4)$$

сумування квадратів оцінок часткових критеріїв 4.5:

$$C_{\Sigma v} = \sqrt{(w_1 K_1)^2 + (w_2 K_2)^2 + \dots + (w_n K_n)^2} \quad (4.5)$$

Пакет *Weicontrol Model* реалізує класи визначення активного складу вітрової електричної станції.

Клас *SimplePacking* реалізує методи розв'язку задачі пакування рюкзака при визначенні активного складу вітрової електричної станції класичним методом динамічного програмування.

$$b_1 P_1 + b_2 P_2 + \dots + b_m P_m \leq P, \quad b_1 C_1 + b_2 C_2 + \dots + b_m C_m \rightarrow \max \quad (4.6)$$

де  $b_1, b_2, \dots, b_m$  – набір бінарних величин;  $C_j > 0$  - ефективність  $j$ -ої вітроустановки.

Складність алгоритму рівна  $O(N \cdot P)$ , де  $N$  - кількість предметів,  $P$  - задана потужність. Задачу розв'язано методом динамічного програмування з використанням табличного способу зберігання проміжних результатів. На вході формується двовимірний масив, стовпці якого відповідають за ємність рюкзака, а рядки – за кількість вітрових електричних установок (таблиця 4.1).

**Таблиця 4.1**

Табличний спосіб розв'язання задачі пакування рюкзака

	0	1	...	P
s=0	еф. P1	еф. P1		еф. P1
s=1	еф. P1+P2	еф. P1+P2		еф. P1+P2
...				
s=N	еф. P1+...+ P <sub>N</sub>	еф. P1+...+ P <sub>N</sub>		еф. P1+...+P <sub>N</sub>

Потужності ВЕУ зберігаються в масиві  $p[1] \dots p[N]$ , а їх ефективності у  $c[1] \dots c[N]$ . Функція  $A(s, n)$  - максимальна ефективність вітрових електроустановок, які можна покласти у рюкзак місткості  $n$ , при умові, що можна використовувати тільки перші  $s$  предметів із заданих  $N$ . Значення функції  $A(s, n)$ , де  $0 \leq s \leq N$ ,  $0 \leq n \leq P$  зберігаємо у масиві  $A[N+1][P+1]$ .

Задача розв'язується методом динамічного програмування та використовує наступний алгоритм:

```
int A[N+1][P+1];
for(n=0;n<=P;++n) // заповнюємо нульову стрічку
    A[0][n]=0;
for(s=1;s<=N;++s) { // s - максимальний номер предмета, який можна використати
    for(n=0;n<=W;++n) { // P - ємність рюкзака
        A[s][n]=A[s-1][n];
        if (n>=p[s] && ( A[s-1][n-p[s]]+c[s] > A[s][n]))
            A[s][n] = A[s-1][n-p[s]]+c[s];
    }
}
```

Функція  $A(s, n)$  має краєві значення:

- якщо  $s = 0$ , то  $A(0, n) = 0$  для всіх  $n$  (жодний предмет не може бути взятий, тому максимальна ефективність набору рівна нулю);
- якщо  $n = 0$ , то  $A(s, 0) = 0$  для всіх  $s$  (можна брати будь-які із перших  $s$  предметів, але місткість рюкзака рівна нулю).

Клас *MaxPowerPacking* реалізує алгоритм розв'язку задачі пакування рюкзака методом динамічного програмування з поправкою на навантаження, яке необхідно забезпечити. Підхід полягає в збільшенні навантаження споживачів, на експериментально встановлений відсоток. Для цього проводиться комп'ютерне симулювання роботи ВЕС. На вхід на кожній ітерації подається навантаження і класичним методом динамічного програмування визначається активний склад ВЕС, потужність ВЕС, а також значення коефіцієнта недопакування. На кожній наступній ітерації навантаження збільшується, на значення коефіцієнта недопакування отримане на попередній ітерації:

$$P_{i+1} = P \cdot (1 + k_i) \quad (4.7)$$

де  $i \in [1; n]$ ,  $k$  - коефіцієнт недопакування  $i$ -ої ітерації,  $P$  - навантаження, яке необхідно забезпечити.

Задача розв'язується аналогічно, методом динамічного програмування, поправка розраховується на навантаження. Основна мета даної методики зменшити відсоток недопакування, який присутній при розв'язанні класичної задачі пакування рюкзака.

Клас *DPModification* реалізує алгоритм розв'язку задачі пакування рюкзака модифікацію методу динамічного програмування, яка полягає в зміні функції мети

так, щоб враховувались проміжний коефіцієнт ефективності та відсоток недопакування. Задача формується наступним чином: на вході є  $N$  вітрових електроустановок,  $i$ -та має потужність  $p_i > 0$  та коефіцієнт ефективності  $k_i > 0$ . Необхідно вибрати такий набір ВЕУ, щоб виконувались умови 3.32 та 3.33. Для розв'язання задачі вводиться адитивна функцію мети  $W$ , яка залежать від двох параметрів  $\Delta P, \bar{K}$ , які розраховуються за формулою 3.34.

Дана задача вирішується застосуванням описаного рекурсивного алгоритму. Для зменшення кількості обчислень використано мемоізацію, яка дозволяє зменшити час роботи з  $O(N) = 2^N$  до  $O(N) = NP$

Задача розв'язується використанням наступного алгоритму:

```
public BitSet getOptimalSet() {
    final int N = set.size();
    A = new setWEI[2][(int) (Wset + 1)];
    int input = 1, out = 0, temp;
    for (int i = 0; i < A[out].length; i++) {
        A[out][i] = new setWEI();
    }
    for (int item = 1; item <= N; item++) {
        if (mark.isAvailable(set.get(item - 1)) == false) {
            continue;
        }
        for (int w = 0; w <= Wset; w++) {
            int i = (int) (w - mark.getWeight(set.get(item - 1)));
            i = (i < 0) ? 0 : i;
            double sumProfit = mark.getGeneralProfit(A[out][i], set.get(item - 1), w);
            final setWEI a = A[out][i];
            final setWEI b = A[out][i + 1];
            if (!A[out][i].equals(A[out][i + 1])) {
                final int j = i + 1;
                final double sumProfit2 = mark.getGeneralProfit(A[out][j],
                    set.get(item - 1), w);
                if (sumProfit < sumProfit2) {
                    i = j;
                    sumProfit = sumProfit2;
                }
            }
            final double prevMark = mark.getGeneralProfit(A[out][w], w);
            if (sumProfit > prevMark) {
                A[input][w] = new setWEI();
                A[input][w].setProfit(
                    A[out][i].getProfit() + mark.getProfit(set.get(item - 1)));
                A[input][w].setWeight(
                    A[out][i].getWeight() + mark.getWeight(set.get(item - 1)));
                A[input][w].getOptimalSet().set(item - 1, true);
                A[input][w].getOptimalSet().or(A[out][i].getOptimalSet());
            } else {
                A[input][w] = A[out][w];
            }
        }
        temp = input, input = out, out = temp;
    }
    denegratedProfit = A[out][(int) Wset].getProfit()
        / A[out][(int) Wset].getOptimalSet().cardinality();
    final BitSet result = A[out][(int) Wset].getOptimalSet();
    return result;
}
```

Клас *BranchAndBound* реалізує алгоритм розв’язку задачі пакування рюкзака методом гілок та границь. Метод гілок і границь є варіацією методу повного перебору з тією лише різницею, що свідомо виключаються неоптимальні гілки дерева повного перебору. Як і метод повного перебору, він дозволяє знайти оптимальне рішення та відноситься до точних алгоритмів. Задача вирішується використанням наступного алгоритму:

```
public void knapsack(int lvl, int sum, int vl) {
    curstore[lvl]++; // add another current item to store
    sum += size[lvl]; // increment sum
    vl += val[lvl]; // increment val
    if (sum <= M) {
        if (vl > maxval) { // if new maxval is found, update it
            maxval = vl;
            for (int i = 1; i <= N; i++)
                maxstore[i] = curstore[i];
        }
        for (int i = lvl; i <= N; i++) { // start loop with current item
            if (sum + size[i] <= M) { //only try an item if size not over M
                knapsack(i, sum, vl);
            }
        }
    }
    curstore[lvl]--; // backtrack by decrementing count of cur. item
}
```

*Додаткові компоненти* – це рівень аплікації. Він містить компоненти, які допомагають прискорити отримання розв’язку конкретних завдань. Крім того на даному рівні знаходиться база даних MySQL (Structured Query Language – мова структурованих запитів) та додаткові компоненти від сторонніх розробників, а саме бібліотека, що спрощує створення різноманітних складних діаграм JFreeChart, бібліотека створення зручних користувацьких інтерфейсів Swing та бібліотека SPRING для реалізації архітектури системи.

Схема бази даних СППР складається з таких основних таблиць “Вітрова електрична установка”, “Продукційні правила ВЕУ”, “Результати роботи ВЕС”, “Історичні дані ВЕУ”, “Енергоакумулюючий елемент”, “Історичні значення швидкості вітру”, “Набір ВЕУ” (рисунок 4.5).

Таблиця бази даних “Вітрова електрична установка” вміщає основні параметри вітрової енергоустановки (модель, номінальна потужність, діаметр ротора, мінімальна та максимальна швидкості вітру для ВЕУ), параметри які визначають ефективність вітрової електроустановки (кількість

включень/виключень, кількість виробленої енергії, технічний стан, час напрацювання), та залученість в активний склад ВЕС.

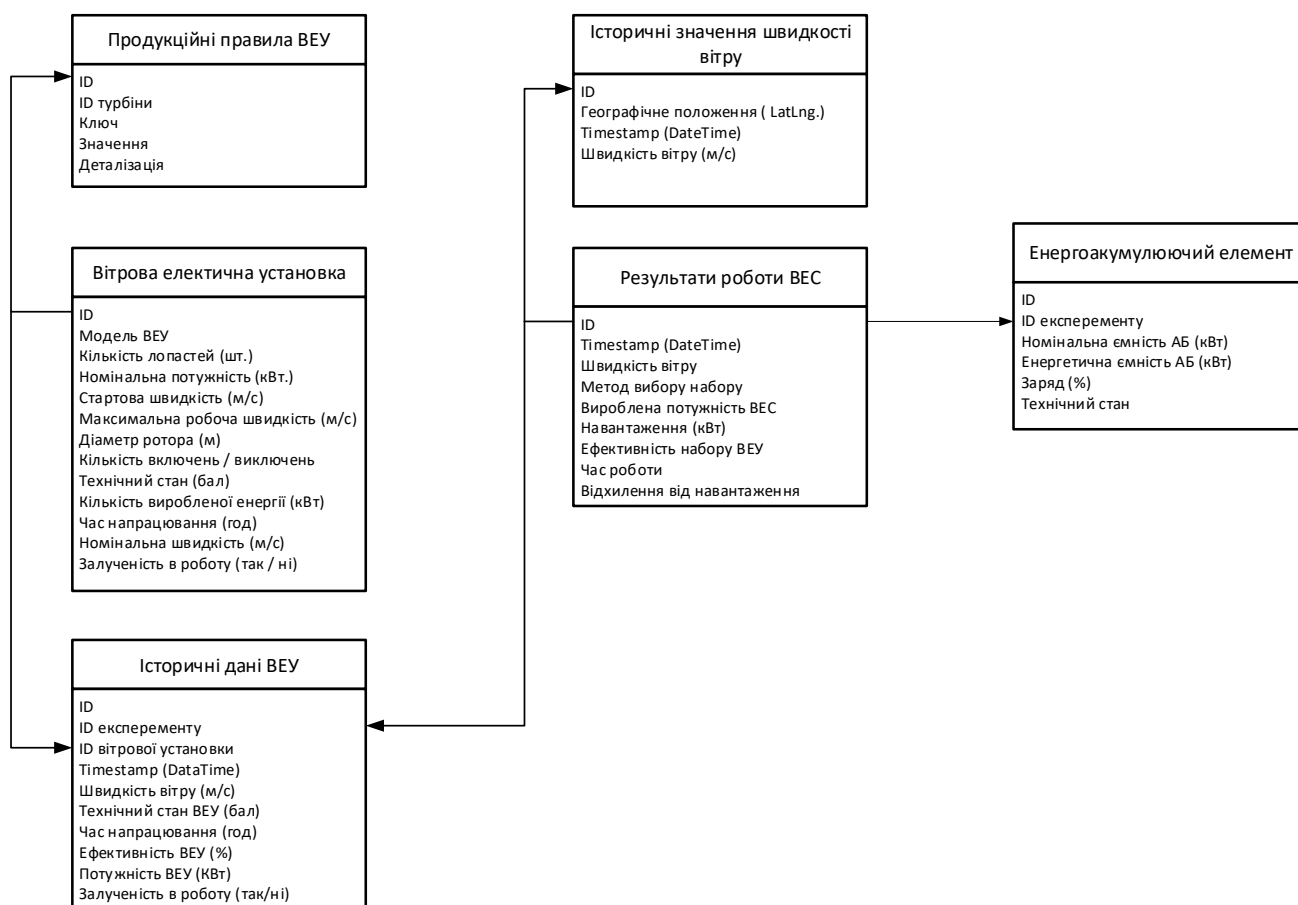


Рисунок – 4.5 Схема бази даних системи підтримки прийняття рішень

Таблиця бази даних “Продукційні Правила ВЕУ” містить інформацію про критичні параметри вітрової електроустановки. Дані в таблиці зберігаються у вигляді триплетів, тобто в основі лежить послідовність “об’єкт – атрибут – значення”. У даному конкретному випадку об’єктом є конкретний вид ВЕУ (ідентифікатор ВЕУ), атрибутом є унікальний ключ, а значення – це власне межа існування правила.

У системі використовуються такі ключі (атрибути): TechnicalState (Технічний стан ВЕУ), WorkingTime (Напрацьований час), MinStartWindSpeed (Мінімальна стартова швидкість вітру), SwitchCount (Кількість включень/виключень ВЕУ). Кількість ключів при розширенні системи може бути збільшена.

Таблиця бази даних “Енергоакумулюючий елемент” містить технічну інформацію про акумуляторну батарею, а саме номінальну та енергетичну ємність АБ, рівень заряду та відомості про технічний стан енергоакумулюючого елемента.

Таблиця бази даних “Історичні значення швидкості вітру” містить архівні дані швидкості вітру для конкретного географічного положення, отримані в момент перерахунку активного складу вітрової електричної станції.

В системі передбачено засоби зберігання інформації про стан системи на момент прийняття рішення, що дає змогу аналізувати результати в певних часових проміжках. Окрім інформації щодо прийнятих рішень, в базі даних зберігаються параметри ВЕУ, основні параметри вітрової електричної станції, значення швидкості вітру, відхилення потужності ВЕС від потужності навантаження, значення вагових коефіцієнтів важливості, потужність навантаження. Описані дані зберігаються у двох табличках “Історичні дані ВЕУ” та “Результати роботи ВЕС”.

Останній рівень архітектури системи підтримки прийняття рішень – *рівень OPC UA – Server*. Використання даного сервера є обґрунтованим, оскільки відкриває широкі можливості щодо дослідження адекватності роботи системи підтримки прийняття рішення. Структура взаємодіючих блоків системи подана на рисунку 4.6.

Особливістю розробленої системи підтримки прийняття рішень є простий інтерфейс, мінімальна кількість обов’язкових параметрів налаштування, гнучкість налаштувань, достатня швидкодія.

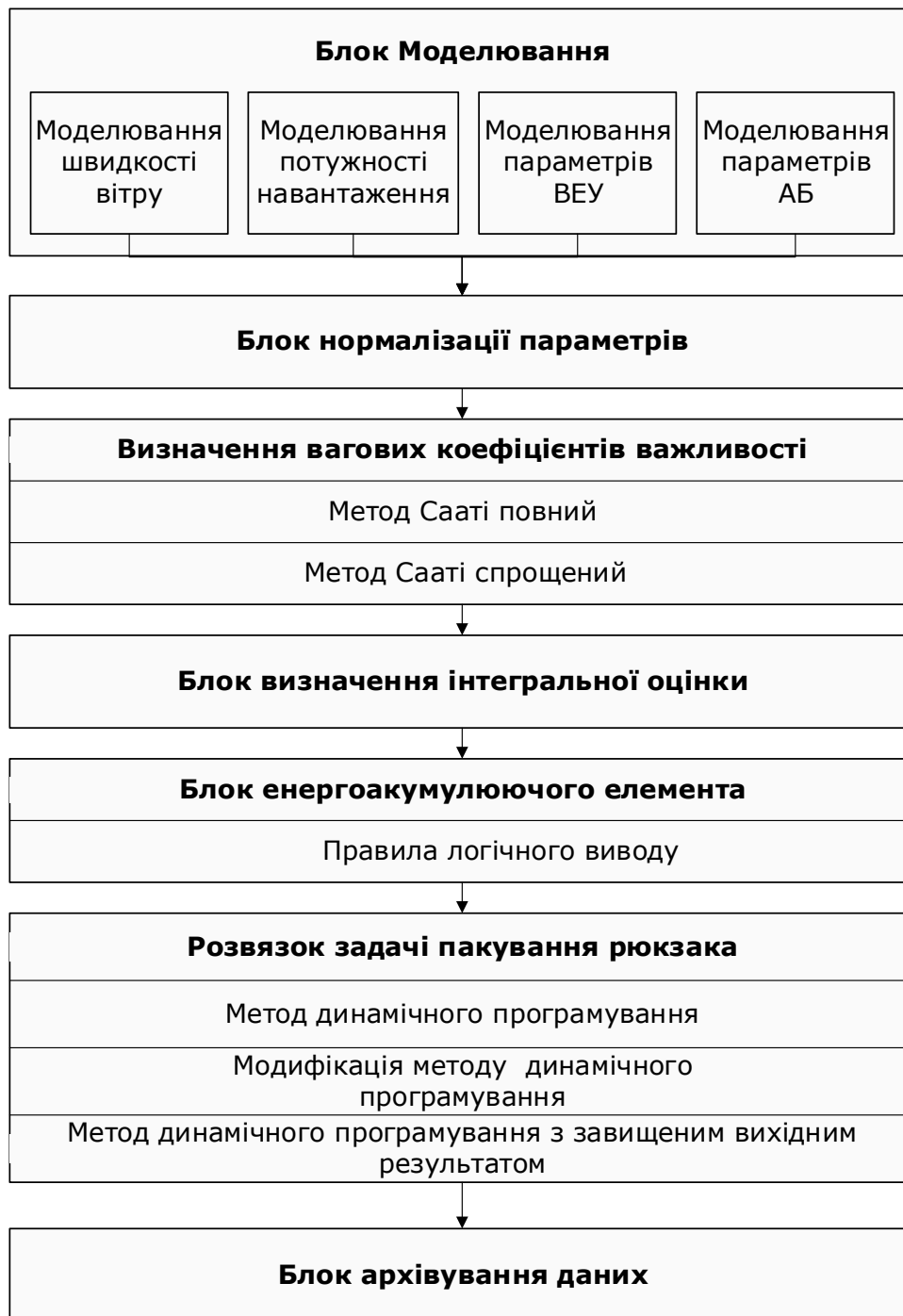


Рисунок – 4.6 Функціональні блоки системи підтримки прийняття рішення

### 4.3. Дослідження режимів роботи системи управління вітровою електричною станцією

Проведено комп'ютерне симулювання роботи системи управління вітровою електричною станцією, з використанням тестових даних, для визначення оптимального, за параметром числа перемикачів, розміру енергоакumuлюючого елемента у відсотковому еквіваленті відносно номінальної потужності вітропарку.



Сформовано тестовий набір з 1000 значень навантаження в інтервалі [5000; 15000] кВт. Досліджувалися режими роботи вітрової електричної станції, яка складається з 60 ВЕУ. Основні характеристики ВЕУ наведено у таблиці 4.2.

Аналогічно, сформовано тестовий набір з 1000 значень швидкостей вітру в інтервалі [5; 15] м/с.

Здійснено по 1000 експериментів для кожної енергетичної ємності акумуляторної батареї.

**Таблиця 4.2**

Основні характеристики вітроенергетичних установок ВЕС

Типи ВЕУ	ENERCON E-48	ENERCON E-44	V52-850
Кількість ВЕУ	20	20	20
Потужність ротора, кВт	800	900	850
Діаметр ротора, м	48	44	52
Стартова робоча швидкість, м/с	3	3	3
Номінальна швидкість вітру, м/с	17	14	14
Максимальна робоча швидкість м/с	25	25	25

Реальна потужність кожної ВЕУ залежить від поточної швидкості вітру та експлуатаційних характеристик ВЕУ (кількість включень та виключень, кількість виробленої енергії, робочий діапазон швидкостей вітру, технічний стан установки та час напрацювання).

Здійснено аналіз результатів комп'ютерного симулювання роботи вітрової електричної станції з використанням розробленої модифікації та встановленими характеристиками ВЕС (потужність ВЕУ, енергетична ємність енергоакумуляуючого елемента, кількість ВЕУ кожного типу). Результати аналізу подані в таблиці 4.3. Аналіз результатів комп'ютерного симулювання роботи системи управління вітровою електричною станцією, з використанням акумуляторних батарей різної ємності:

Для визначення активного складу вітрової електричної станції здійснено 2 типи експериментів [153]:

- з застосуванням класичного методу динамічного програмування;
- з застосуванням розробленої модифікації методу динамічного програмування.

**Таблиця 4.3**

Результати застосування АБ різної ємності, в структурі ВЕС (класичний метод динамічного програмування)

Енергетична ємність акумулятора (% від встановленої потужності ВЕС)	0	1%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Максимальне відхилення %	-2,465	-2,405	-2,445	-2,445	-2,435	-2,435	-2,415	-2,42
Середнє відхилення потужності ВЕС від потужності навантаження	1,29%	1,17%	0,92%	0,58%	0,44%	0,52%	0,41%	0,38%
Кількість перевизначень	887	809	612	394	273	244	203	184
Кількість експериментів	1000							

**Таблиця 4.4**

Результати застосування АБ різної ємності, в структурі ВЕС (модифікація методу динамічного програмування)

Енергетична ємність акумулятора (% від встановленої потужності ВЕС)	0	1%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Максимальне відхилення %	-2,46	-2,45	-2,495	-2,44	-2,49	-2,125	-2,45	-2,355
Середнє відхилення потужності ВЕС від потужності навантаження	0,68%	0,58%	0,46%	0,32%	0,21%	0,27%	0,28%	0,28%
Кількість перевизначень	864	806	625	383	260	199	183	157
Кількість експериментів	1000							

### Перший тип експериментів.

На рисунку 4.7 наведено результат моделювання роботи системи управління вітровою електричною станцією за наявності енергоакумулюючого елемента різної ємності (0%, 1%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%) з використанням класичного методу динамічного програмування (КДП).

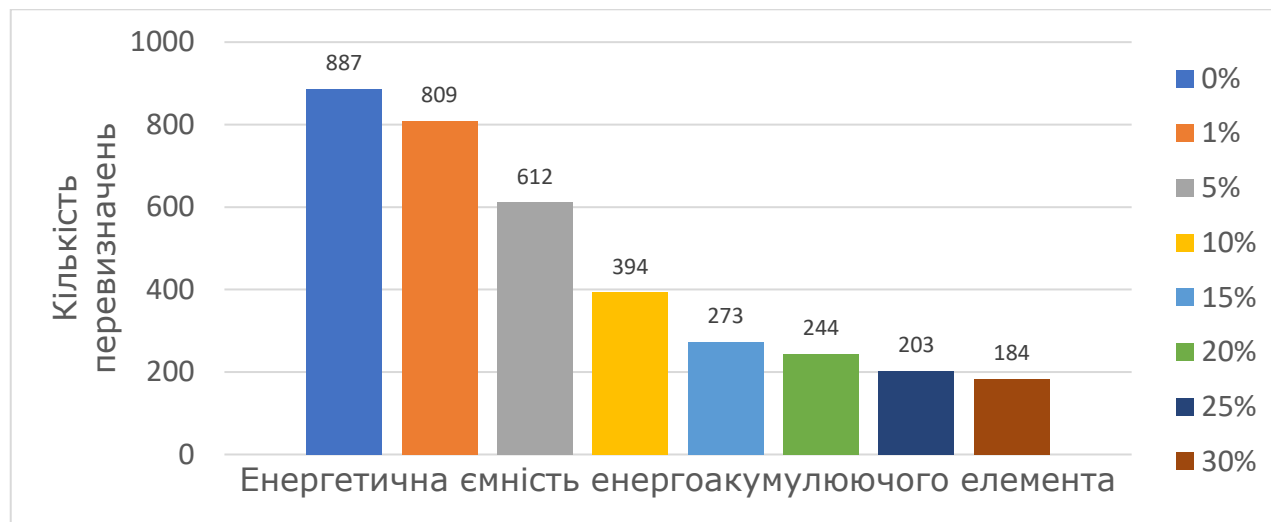


Рисунок – 4.7. Залежність числа перемикань активного складу ВЕС від енергетичної ємності акумуляторної батареї при використанні класичного методу динамічного програмування

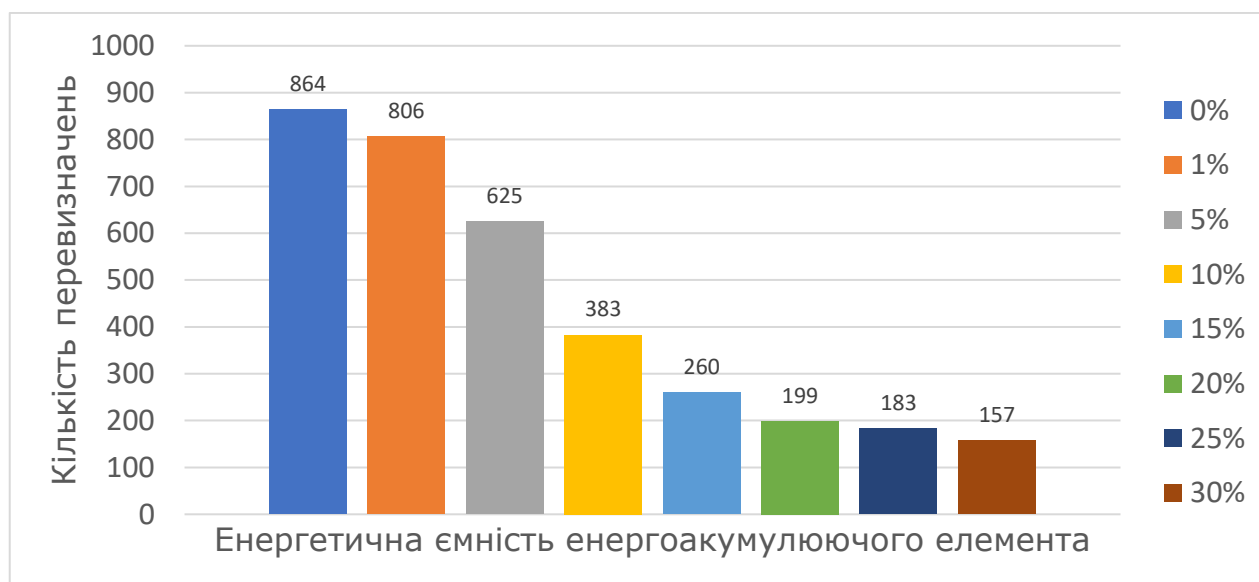


Рисунок – 4.8 Залежність числа перемикань активного складу ВЕС від енергетичної ємності акумуляторної батареї при використанні модифікованого методу динамічного програмування

Аналогічно, на рисунку 4.8 наведено результат моделювання роботи системи управління вітровою електричною станцією за наявності енергоакумулюючого елемента різної ємності (0%, 1%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%) з використанням модифікованого методу динамічного програмування (МДП).

Отримані результати підвищують доцільність використання енергоакумулюючого елемента в структурі ВЕС, оскільки забезпечується можливість суттєво зменшити кількість перевизначень активного складу вітрової електричної станції. З рисунку 4.8 видно, що використання енергоакумулюючого елемента (ЕАЕ) ємністю 10% від номінальної потужності вітропарку дає забезпечує зменшення кількості перевизначень в 2.25 раз з 887 до 394 при визначенні КДП, та в 2,25 рази з 806 до 383 при визначенні за допомогою МДП.

Залежність кількості перевизначень складу ВЕС від енергетичної ємності акумуляторної батареї показує їх неперервне зменшення при збільшенні енергетичної ємності АБ, проте при використанні батареї з енергетичною ємністю 15% від номінальної потужності ВЕС, відсоток зменшення кількості переключень поступово зменшується, що зменшує, відповідно ефективність такого застосування за критерієм “вартість”.

Динаміку відхилення виробленої потужності від навантаження, яке необхідно забезпечити при використанні класичного методу динамічного програмування та розробленої модифікації методу динамічного програмування з використанням енергоакумулюючих елементів різної ємності в структурі наведено в Додатку В (рисунки В.1 – В.7).

На рисунку 4.9 відображено лінійну варіацію класичного методу динамічного програмування та модифікації методу динамічного програмування для вибірки з 1000 значень навантаження та швидкості вітру, при використанні енергоакумулюючого елемента ємністю 0%, 1%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%. (з графіка видно, що середнє відхилення для КДП є приблизно в 2 рази більшим порівняно з МДП).

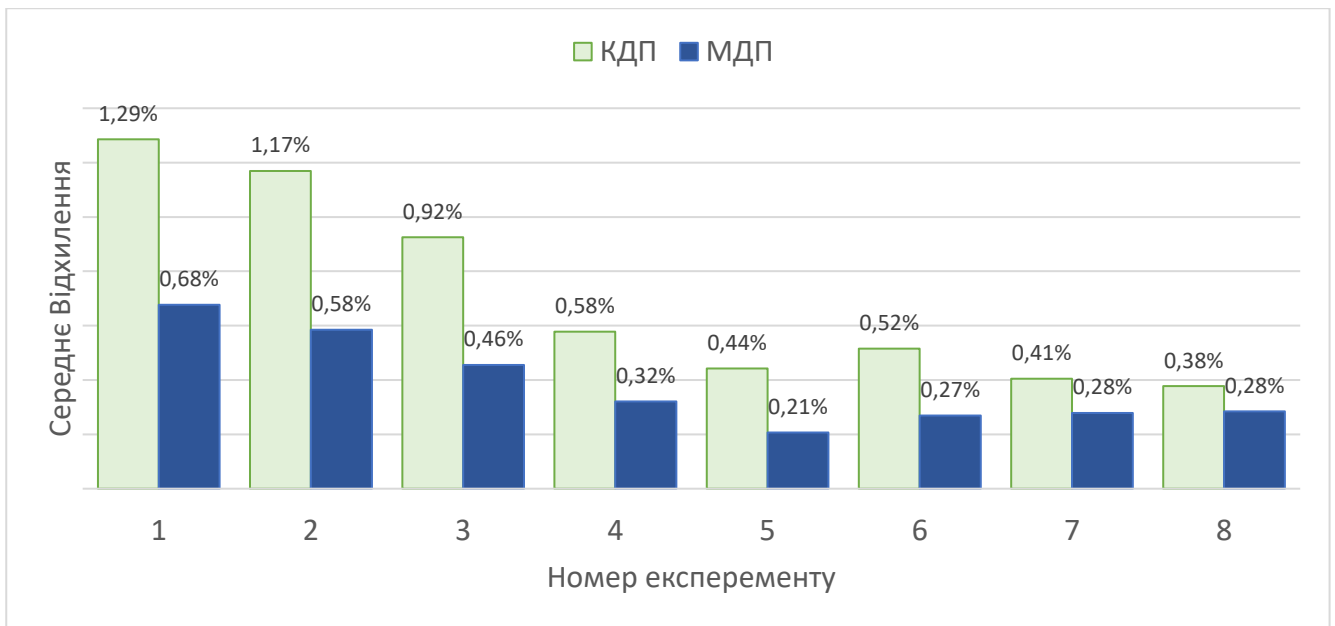


Рисунок – 4.9 Лінійна варіація класичного методу динамічного програмування та модифікації методу динамічного програмування при визначенні активного складу вітрової електричної станції

Ефективність розробленої інформаційної технології прийняття рішення досліджено шляхом комп'ютерного симулювання. Результати реалізації імітаційної моделі наведено в додатках (таблиця В.1).

#### 4.4. Статистичний аналіз отриманих результатів

Для оцінки ефективності результатів роботи системи підтримки прийняття рішень, використано теорію ймовірності та математичну статистику [8, 10, 39]. Вивчення закономірності розподілу є одним з важливих завдань статистики. Вирішити це завдання можна за допомогою узагальнюючих характеристик, які поділяються на:

- характеристики центру розподілу (середина, мода, медіана);
- характеристики міри та ступеня варіації;
- характеристики типу (форми) розподілу.

Характеристики центру розподілу відображають типовий рівень ознаки в якісно однорідній сукупності. Проте ці характеристики не відображають міри “розсіювання” індивідуальних значень ознаки у відношенні до середньої. Можуть бути випадки, коли середні значення ознаки двох сукупностей однакові, а характер

розподілу цих сукупностей різний. Саме тому виникає необхідність при здійсненні аналізу результатів обчислювати показники, які характеризували б міру варіації, тобто міру відхилень індивідуальних значень ознаки від середньої. Такими показниками і є характеристики другої групи, а саме:

До основних мір і ступеня варіації відносимо:

1) Розмах варіації:

$$R = X_{\max} - X_{\min}, \quad (4.8)$$

де  $X_{\max}$ ,  $X_{\min}$  – максимальне та мінімальне значення серед усіх варіантів.

Цей показник, як бачимо, базується на крайніх значеннях ознаки. Може статись, що одне з цих значень є цілком випадкове, тому  $R$  не є надійним показником варіації.

2) Середнє лінійне відхилення:

$$l = \frac{\sum |X - \bar{X}|}{n} \quad (4.9)$$

де  $X$  - індивідуальне значення варіанта;  $\bar{X}$  - середнє значення варіантів;  $n$  - кількість варіантів.

Ця характеристика показує наскільки в середньому відхиляються індивідуальні значення варіантів від середньої сукупності. Ця характеристика в математичному відношенні дещо некоректна, бо при її обчисленні ігноруються математичні значення.

Абсолютно коректними в цьому відношенні є такі характеристики, як дисперсія і середнє квадратичне відхилення.

3) Дисперсія (середній квадрат відхилення):

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n} \quad (4.10)$$

4) Середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (4.11)$$

Наведені вище характеристики є показниками міри варіації.

5) Коефіцієнт варіації:

лінійний коефіцієнт варіації:

$$V = \frac{l}{X} \cdot 100\% \quad (4.12)$$

квадратичний коефіцієнт варіації:

$$V = \frac{\sigma}{X} \cdot 100\% \quad (4.13)$$

Ця характеристика показує на скільки % в середньому відхиляються індивідуальні значення варіантів від середнього їх значення по сукупності

Математичне сподівання дискретного розподілу визначається за наступною рівністю:

$$M[Z] = \sum_{i=1}^{\infty} x_i p_i \quad (4.14)$$

де  $x_i$  - розв'язок задачі на  $i$ -му експерименті;  $p_i$  - ймовірність появи величини

$x_i$ , причому  $\sum_{i=0}^{\infty} p_i = 1$ .

Ефективність розробленої інформаційної технології досліджено шляхом комп'ютерного імітаційного симулювання. Поведінку системи в часі відтворено засобами дискретно-подієвого моделювання. Результати кожного окремого експерименту записувались у масив даних, після чого здійснювалась їх обробка.

Для комп'ютерного симулювання підготовлено такі вхідні дані: сформовано тестовий набір з 1000 значень швидкостей вітру в інтервалі [10; 15] м/с, аналогічно сформовано тестовий набір з 1000 значень навантаження в інтервалі [10000; 12000] кВт. Досліджувалися режими роботи вітрової електричної станції, яка складається з 60 ВЕУ. Основні характеристики ВЕУ наведено у таблиці 4.2.

Здійснено по 1000 експериментів для кожної енергетичної ємності энергоакумулюючого елемента (а саме для енергетичної ємності 0%, 1%, 5%, 10%, 15% номінальної потужності ВЕС). Експерименти реалізовано засобами OPC UA - сервера.

Результати роботи імітаційного моделювання наведені у в таблиці 4.5 (а також в додатках В.8 – В.10).

Аналіз отриманих результатів показує, що середнє відхилення отриманої потужності ВЕС від навантаження, яке необхідно забезпечити (рисунок 4.11а) зменшується з  $-0,68\%$  (при використанні класичного методу динамічного програмування) до  $-0,01\%$  (при використанні модифікації методу динамічного програмування та енергоакумулюючого елемента в складі).

**Таблиця 4.5**

Результати роботи імітаційного моделювання з використанням розроблених алгоритмів та енергоакумулюючого елемента різних ємностей

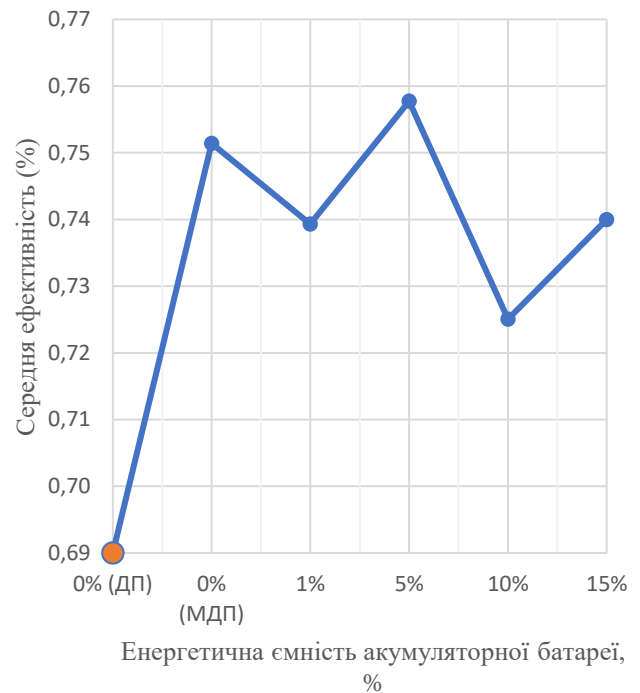
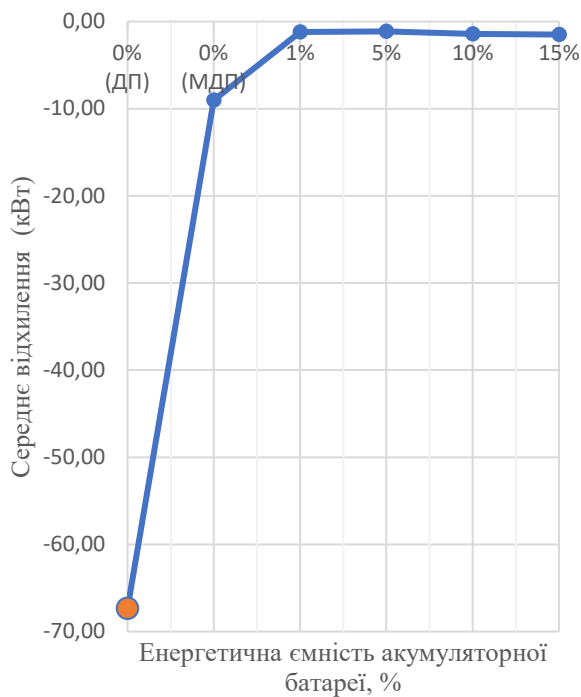
Метод Параметр	КДП кВт	МДП кВт				
	0	1	5	10	15	
Середнє лінійне відхилення %	0,46	0,35	0,14	0,06	0,08	0,06
Середнє квадратичне відхилення кВт	68,02	56,98	26,59	12,12	19,48	17,39
Максимальне відхилення %	-0,04	3,43	2,02	0,85	2,20	2,20
Мінімальне відхилення %	-5,90	-3,32	-2,63	-1,04	-1,73	-1,73
Розмах варіації	490,60	579,80	474,00	208,00	401,90	401,90
Різниця між мат сподіванням навантаження і потужністю ВЕС %	-0,67	-0,09	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02
Середнє відхилення від навантаження кВт	-67,34	-9,03	-1,20	-1,13	-1,41	-1,50
Середня ефективність %	0,69	0,75	0,74	0,75	0,73	0,73

Розмах варіації для класичного методу динамічного програмування складає  $R = 490.60$  кВт, при використанні МДП в діапазоні  $R = [208.00; 579.80]$ , залежно від ємності акумуляторної батареї (слід зауважити, що для МДП при обчисленні розмаху враховуються відхилення в сторону перевиробітку), середнє лінійне відхилення для КДП  $l = 44.92$  кВт, проти  $l = [5.81; 33.41]$  кВт, дисперсія сукупності значень для КДП  $\sigma^2 = 2349$ , проти  $\sigma^2 = [146.79; 3246.81]$  для МДП, середнє квадратичне відхилення для КДП  $\sigma = 68.02$  кВт, проти  $\sigma = [12.12; 56.98]$  кВт для МДП.

На підставі аналізу результатів проведених експериментів, визначено що застосування розробленої інформаційної технології управління з використанням



розробленої модифікації методу динамічного програмування збільшує середню ефективність вибраного набору з 0,69 до 0,76 (рисунок 4.10.б).



а) Середнє відхилення від навантаження кВт

б) Середня ефективність %

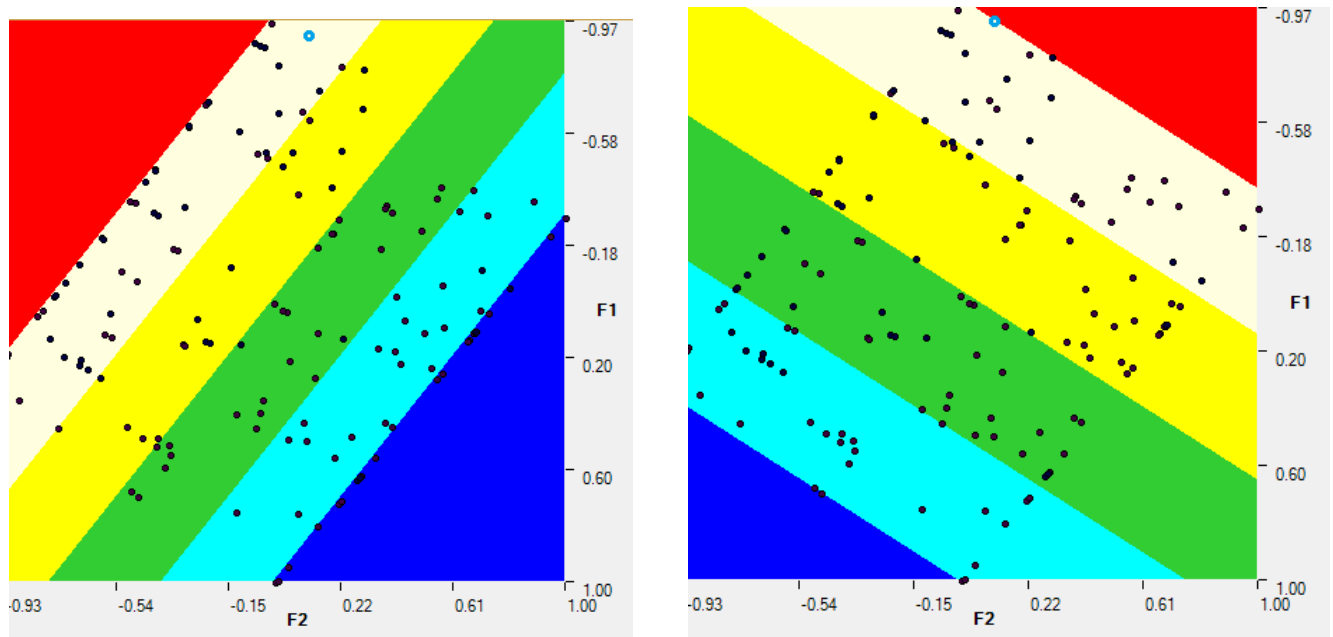
Рисунок – 4.10 Аналіз результатів імітаційного моделювання з використанням засобів інтелектуалізації

Для візуалізації представлення багатовимірних даних використовується графічне відображення множини вхідних даних на двовимірних ситуаційних картах особливостей (СКО) [110, 111]. Принцип побудови СКО є наступним. Для обчисленої на етапі навчання множини значень на виході перших двох нейронів прихованого шару нейронної мережі візуалізації визначаються діапазони зміни, задається кількість елементів зображення (пікселів) СКО та обчислюються величини кроків дискретизації по кожній з координат. Надалі розраховуються значення елементів множини всіх можливих пар координат, які відповідають елементам зображення СКО. Значення елементів з цієї множини послідовно подаються безпосередньо на вихід прихованого шару нейронної мережі в режимі використання. Тоді для кожного елемента будуть розраховані відповідні значення на виході нейронної мережі в цілому. Для кожного з  $n$  виходів нейронної мережі

визначається діапазон зміни значень для навчальної множини, який розділяється на певну кількість рівнів. Значенням, що належать до кожного рівня, а також значенням, що виходять за межі діапазону зміни, ставиться у відповідність один з кольорів або тонів (за аналогією з фізичною картою у географії). Отже кожне зі значень на виході нейронної мережі буде позначатися кольором на ситуаційній карті особливостей [111].

Побудова СКО здійснюється для усіх ознак вхідних даних, значення яких для кожної з точок (на виходах нейронної мережі) позначаються певним кольором на карті. Таким чином створюється атлас СКО, який описує об'єкт досліджень, що характеризується множиною вхідних даних.

На рисунку 4.11 наведено результати візуалізації вихідних параметрів за допомогою ситуаційних карт особливостей, де F1 і F2 – перша та друга головні компоненти (фактори), вихідні значення першого та другого нейронів прихованого шару. З рисунків 4.11а, 4.11б видно, що параметри “ємність енергоакumuлюючого елемента” та “потужність ВЕС” мають обернену залежність, а саме при збільшенні генерації електричної енергії, зменшується використання ресурсу енергоакumuлюючого елемента



а) за параметром  
“ємність енергоакumuлюючого елемента”

б) за параметром  
“потужність ВЕС”

Рисунок 9 – Візуалізація вихідних параметрів ситуаційними картами особливостей

На картах окремо відображається останній актуальний стан системи (окремим кольором), що забезпечує можливість моніторингу стану системи в режимі реального часу та швидкого реагування на критичні енергодинамічні режими.

#### **Висновки до розділу 4**

У четвертому розділі реалізовано засоби інтелектуалізації автоматизованої системи управління вітровою електричною станцією, які забезпечують функціонування системи підтримки прийняття рішення диспетчером при управлінні енергодинамічними процесам. Розроблені засоби побудовано з використанням OPC UA стандарту, який може бути інтегрований у сучасні SCADA – системи.

Результати комп'ютерного симулювання роботи системи управління вітровою електричною станцією, з використанням тестових даних та дослідження залежності кількості перевизначень активного складу вітрової електричної станції від енергетичної ємності енергоакумулюючого елемента дають змогу економічного та технічного обґрунтування ємності акумуляторної батареї. На підставі аналізу проведених експерименті взатовлено, що застосування розроблених засобів інтелектуалізації системи управління збільшує середню ефективність активного складу ВЕС з 0,69 до 0,75.

Встановлено залежність кількості перевизначень активного складу вітрової електричної станції від енергетичної ємності енергоакумулюючого елемента, а також вплив енергетичної ємності засобів акумулювання електричної енергії на динаміку управління процесами генерації енергії.

Ситуаційні карти особливостей розроблені з використанням штучних нейронних мереж забезпечують візуалізацію параметрів системи в режимі реального часу та дають змогу оперативного реагування диспетчером на критичні значення навантаження споживачів та потужності вітрової електричної станції.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень розв'язано актуальне наукове завдання інтелектуалізації системи управління енергетичними режимами вітрової електричної станції з використанням розроблених засобів підтримки прийняття оператором рішень щодо набору (складу) вітрових агрегатів, які доцільно використовувати в даний час (період часу) з врахуванням можливостей засобів акумулювання енергії.

При цьому отримано такі основні результати:

1. Розроблено метод статистичного аналізу швидкості вітру з використанням сімейств двопараметричних неперервних розподілів, що забезпечило можливість визначення ймовірного діапазону робочих швидкостей вітру для оцінювання потужності ВЕС.

2. Удосконалено метод динамічного програмування для визначення активного складу ВЕС, шляхом введення адитивної функції мети, який дає змогу зменшити середнє відхилення сукупної потужності вітропарку від потужності навантаження на 90% порівняно з класичним методом динамічного програмування.

3. Встановлено залежність числа перевизначень активного складу вітрової електричної станції з врахуванням потужності та ефективності ВЕУ, що забезпечує можливість обґрунтування необхідної енергетичної ємності енергоакумулюючого елемента.

4. Розроблено модель управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції на основі бази продукційних правил з врахуванням ємності енергоакумулюючого елемента, що забезпечує можливість інтелектуалізації процесів управління енергодинамічними режимами.

5. Розроблено інтелектуальний блок управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції за наявності енергоакумулюючого елемента, який дає змогу забезпечити потреби споживачів в періоди несприятливих погодних умов та мінімізувати число перевизначень активного складу вітрової електричної станції.

6. Побудовано ситуаційні карти особливостей, на основі штучних нейронних мереж, які забезпечують візуалізацію вихідних параметрів в режимі реального часу, та дають змогу оперативного реагування на критичні значення параметрів навантаження та потужності вітрової електричної станції.

7. Розроблено систему підтримки прийняття рішень щодо активного складу ВЕС, яка реалізована з використанням стандарту OPC UA, чим досягається універсальність розробки та можливість застосування на контролерах різних виробників.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Авдошин С. М. Криптоанализ: современное состояние и перспективы развития / С. М. Авдошин, А. А. Савельева // Информационные технологии: Научно-технический и научно-производственный журнал. – 2007. – № 3
2. Агеев В.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / В.А. Агеев.– Москва, 2004. – 174 с.
3. Айзерман М.А. Выбор вариантов: основы теории / М.А. Айзерман, Ф.Т. Алескеров . – М.: Наука. – 1990.– 240 с.
4. Алтунин, А.Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин. – Тюмень: ТГУ.–2000. – 352 с.
5. Андерсен, Т. Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсен.– М.: Мир, 1976. – 680 с.
6. Андрианов В.Н. Ветроэлектрические станции / В.Н. Андрианов, Д.Н. Быстрицкий, К.П. Вашкевич, В.Р. Секторов.– Москва, Государственное энергетическое издательство. – 1960. –320 с.
7. Андриевский Е.Н. Диспетчерский пункт района распределительных сетей / Е.Н. Андриевский. – М.: Энергоатомиздат. –1987. –112 с.
8. Андронов А.М. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для вузов / А.М. Андронов, Е.А. Копытов, Л.Я. Гринглаз. – СПб.: Питер, 2004. – 461 с.
9. Арзамасцев Д.А. АСУ и оптимизация режимов энергосистем: Учеб. Пособие для студентов вузов / Д.А. Арзамасцев, П.И. Бартоломей, А.М. Холян. – М.: Высш. шк. – 1983. – 208 с.
10. Бабайцев В.А. Математика в экономике. Теория вероятностей: Курс лекций / В.А. Бабайцев, А.В. Браилов, А.С. Солодовников. – М.: Финансовая академия. – 2002. – 232 с.
11. Бабенко Г.А. Экономичность использования нетрадиционной энергетики в АР Крым // Экономика Крыма. – 2002. – №5. – с. 44-50.
12. Баин А.М. Современные информационные технологии систем поддержки принятия решений: учеб. пособие / А.М. Баин. – М.:Форум. – 2009. – 240 с.
13. Батищев Д.И. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации / Д.И. Батищев, Е.А. Неймарк, Н.В. Старостин. – 2007. – Нижний Новгород.– 187 с.
14. Безруких П.П. Ветроэнергетика: справ. и метод. пособ.: / П.П. Безруких. – М.: ИД ЭНЕРГИЯ. – 2010. – 320 с.
15. Безруких П.П. Использование энергии ветра. Техника, экономика, экология / П.П. Безруких. – М.: Колос. – 2008. – 196 с.
16. Бек К. Шаблоны реализации корпоративных приложений / К. Бек. – М.: Издательский дом «Вильямс» . – 2008. – 176 с.

17. Беллман Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М. : Изд-во иностранной лит-ры. –1960. – 400 с.
18. Беллман Р. Динамическое программирование и современная теория управления / Р. Беллман, Р. Кабала. – М. : Изд-во "Наука". – 1969. – 118 с.
19. Беллман Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. – М. : Изд-во "Наука", 1965. – 458 с.
20. Береза А. М. Основи створення інформаційних систем: навч. посіб. / А. М. Береза. – 2 вид., перероб. і доп. – К.: КНЕУ. – 2001. – 214 с.
21. Бідюк П. І. Моделювання і прогнозування фінансово-економічних процесів з використанням принципів системного аналізу / П. І. Бідюк, О. Л. Жиров // Економіка: теорія та практика. – 2014. – № 2. – С. 100-107
22. Блинов И.В. Анализ тенденций развития SCADA – систем для АСУТП электроэнергетических объектов и АСДУЭЭС / И.В. Блинов // сборник трудов магистрантов Донецкого национального технического университета. – 2003. – Выпуск 3. – С. 42-59.
23. Блюмин С.Л. Нечеткая логика: алгебраические основы и приложения / С.Л. Блюмин, И.А. Шуйкова, П.В. Сараев, И.В. Черпаков. – Липецк: ЛЭГИ. – 2002. – 113 с.
24. Бокс Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс . – М.: Мир. – 1974.– 578 с.
25. Брахман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике / Т.Р. Брахман. – М.: Радио и связь. – 1984. – 264 с.
26. Бурков В. Н. Прикладные задачи теории графов / В. Н. Бурков, И. А. Горгидзе, С. Е. Ловецкий. – Тбилиси: Вычислительный центр АН СССР. – 1974. — 231 с.
27. Васильев, Ф.П. Чисельні методи розв'язання екстремальних задач / Ф.П. Васильев. – М.: Наука. – 2002. – С. 415
28. Васько В.П. Управление параметрами электроэнергии автономных ветроэлектрических установок / В.П. Васько // Технічна електродинаміка. –2002. – Вип.1. – С. 53 – 56
29. Веников В.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: Учеб. для вузов / В.А. Веников, В.Г. Журавлев, Т.А. Филиппова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 352 с.
30. Вицентий А. В. Технологии доступа к данным в современных SCADA-системах / А. В. Вицентий, Е. В. Харионовский // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – №7.– с. 56-64
31. Волошин О.Ф. Моделі та методи прийняття рішень: Навчальний посібник / О.Ф. Волошин, С.О. Мащенко. – К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет". – 2006. – 336 с.

32. Волощук Р.В. Нелінійна нормалізація статистичних показників для задачі побудови інтегральних індексів / Р.В. Волощук, В.С. Степашко // Індуктивне моделювання складних систем: Зб. наук. пр. – К.: МННЦ ІТС НАН та МОН України. – 2014. – Вип. 6. – С. 47-54
33. Волощук Р.В. Підходи до нормування економічних показників. Індуктивне моделювання складних систем: Зб. наук. пр. / Р.В. Волощук. – К.: МННЦ ІТС НАН та МОН України. – 2009. – Вип. 1. – С. 17-25
34. Волощук Р.В. Порівняльний аналіз підходів до визначення вагових коефіцієнтів інтегральних індексів стану складних систем / Р.В. Волощук // Індуктивне моделювання складних систем. Зб. наук. праць. – Вип. 5. – К.: МННЦ ІТС НАН та МОН України. – 2013. – С. 151-165
35. Втюрин, В.А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Основы АСУТП / В.А. Втюрин. – Спб.: СГЛА им. С.М. Кирова, 2006. – 152 с.
36. Гамбаров Г.М. Статистическое моделирование и прогнозирование / Г.М. Гамбаров, Н.М. Журавель, Ю.Г. Королев. – М.: Финансы и статистика. – 1990. – С. 140
37. Гамм А.З. Методы решения задач реального времени в электроэнергетике / А.З. Гамм, Ю.Н. Кучеров. – Н-ск: Наука. – 1991. – 272 с.
38. Глотов В.А. Экспертные методы определения весовых коэффициентов / В.А. Глотов, В.В. Павельев. – АиТ, № 12. – 1976. – с. 95-107.
39. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – М.: Высш. шк. – 2003. – 479 с.
40. Гнатієнко Г.М. Експертні технології прийняття рішень: монографія / Г. М. Гнатієнко, В. Є. Снитюк. – К. : Маклаут. – 2008. – 444 с.
41. Гнот В. Застосування архітектурного шаблону MVC у розробці ВЕБ ужитків / В. Гнот, В. Якимович // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. – К.: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2011. – Вип. 58. – С. 185-187
42. Данциг Дж. Линейное программирование, его применения и обобщения / Дж. Данциг. – М.: Прогресс. – 1966
43. Де Рензо Д. Ветроэнергетика / [под ред. Д. де Рензо]; [Пер. с англ. В.В. Зубарева и М.О. Дранкфурта]; [под. ред. Я.И. Шефтера]. – М.: Энергоатомиздат. – 1982. – 272 с.
44. Джонс М.Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях / М.Т. Джонс. – М.: ДМК Пресс. – 2004. – 312 с.
45. ДСТУ 2226–93 Автоматизовані системи. Терміни та визначення. К.: УкрНДІССІ. – 1994. – 92 с.



46. Емец О.А. Евклидовы комбинаторные множества и оптимизация на них. Новое в математическом программировании / О.А. Емец. – К.: УМК ВО. – 1992. – 92 с.
47. Ємець О.О. Задачі комбінаторної оптимізації з дробово-лінійними цільовими функціями: Монографія / О.О. Ємець, Л.М. Колечкіна. – К.: Наук. думка. – 2005. – 117 с.
48. Жоров В.І. Розрахунок виробітку енергії та обґрунтування регулювальних якостей вітроелектричного зарядного агрегату / В.І. Жоров, С.В. Жоров, Д.В. Тимошук // Енергетика і автоматика: Нац. ун-т біорес. і природокор. України. – №1. – 2009. – С. 10.
49. Забарний Г.М. Енергетичний потенціал нетрадиційних джерел енергії України / Г.М. Забарний, А. В. Щурчков. – К.: ІТТФ. – 2002. – С. 151 -159
50. Иванов, В. В. Анализ временных рядов и прогнозирование экономических показателей / В. В. Иванов. – Харьков, ХНУ. – 1999. – 230 с.
51. Кагиров Р.Р. Многомерная задача о рюкзаке: новые методы решения / Р.Р. Кагиров // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2007. – № 3. – С. 16-20
52. Каргиева В.М. Ветроэнергетика. Руководство по применению ветроустановок малой и средней мощности / В.М.Каргиева. – М.: "Интерсоларцентр". – 2001.– 355 с.
53. Катренко А.В. Теорія прийняття рішень / А.В. Катренко, В.В Пасічник, В.П. Пасько. – К.: Видавнича група ВНУ. – 2009. – 448 с.
54. Ковязин Р.Р. Применение технологии ОРС / Р.Р. Ковязин, А.Е. Платунов. – Санкт–Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики. – 2003.– с 71-76
55. Кожухівський А.Д. Застосування генетичних алгоритмів у задачі про укладання ранця / А.Д. Кожухівський, О.О. Намофілова // АСУ и приборы автоматки. – 2015. – №173.–с. 43-47
56. Конюховский П.В. Математические методы исследования операций в экономике / П.В. Конюховский. – СПб.: Питер. – 2000. – 208 с.
57. Костогрізова Н. О. Статистичний аналіз результатів виміру швидкостей вітру / Н. О. Костогрізова, В. В. Дубровська, В. І. Шкляр // Енергетика. – 2014. – № 2. – С. 52-57
58. Кравчишин В. С. Моделювання енергетичного потенціалу вітрової електричної станції / В. С. Кравчишин, М. О. Медиковський, М. О. Галушак // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Інформаційні системи та мережі. – 2016. – № 854. – С. 80-87

59. Кравчишин В.С. Дослідження режимів управління енергодинамічними процесами в системах електропостачання за наявності акумулюючих елементів / В. С. Кравчишин, М. О. Медиковський, Р.В. Мельник, О.Б. Шуневич // Науковий вісник НЛТУ України. – 2016. – т. 26. – № 7. – с. 291 - 298
60. Кравчишин В.С. Управління вітровою електричною станцією за наявності акумулюючого елемента / В. С. Кравчишин, М. О. Медиковський // Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту ISDMCI'2016 : зб. наук. пр. міжнар. наук. конф. – 2016 р. – Залізний Порт, Україна. – с. 83-85
61. Кравчишин В.С. Інтелектуальні засоби прогнозування швидкості вітру / Кравчишин В.С, Медиковський М.О., Шуневич О.Б. // Матеріали другої міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК” – Київ: НУБІП, 2014.– с. 34
62. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия: Ветроэнергетика / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев.– Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т. – Харьков . – 2004. – 519 с.
63. Лобов Г.С. Методы обработки разнотипных экспериментальных данных / Г.С. Лобов. – Новосибирск: Наука. – 1981. – 157 с.
64. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений / О. И. Ларичев. – Логос, М. – 2000 .– 256 с.
65. Літвінов В.В. Використання методів попарного порівняння для визначення пріоритетності способів забезпечення статичної стійкості асинхронних двигунів в умовах багатокритеріального вибору / В.В. Літвінов, М.В. Костерев, П.Л. Денисюк // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2010. – № 2 (143). – С. 24–29.
66. Лукутин Б.В. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении: монография / Б.В. Лукутин, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова. – М.: Энергоатомиздат. – 2008. – 231 с.
67. Лукутин Б.В. Энергоэффективные методы построения атомных ветроэнергетических установок / Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова // Энергетика: экология, надежность, безопасность: материалы докладов XV Всероссийской научно-технической конференции.– Томск: Изд-во ТПУ. – 2009. – С. 23-25
68. Медиковський М. Метод застосування стандарту ОРС при синтезі систем управління / М. Медиковський, О. Шуневич // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” : Комп’ютерні науки та інформаційні

технології. – Львів: Видавництво НУ “Львівська політехніка”. – Львів. – 2010. – № 663. – С. 280-287

69. Медиковський М. Модифікована мережа Петрі для аналізу структури вітрової електростанції / М. Медиковський, О. Шуневич // Motrol – Commission of motorization and energetic in agriculture. – Lublin. – 2012. – Vol. 14. No.4. – P. 178-184.
70. Медиковський М. О. Метод визначення структури вітрової електростанції з врахуванням динаміки навантаження / М. О. Медиковський, О. Б. Шуневич // Моделювання та інформаційні технології : зб. наук. праць. – К.: ІПМЕ НАНУ. – Київ. – 2009. – Вип. 53. – С. 175–181.
71. Медиковський М. О. Моделювання енергодинамічних процесів у системах відновлюваної енергетики / М. О. Медиковський, О. Б. Шуневич // Автоматика–2010 : 17 міжнар. конф. з авт. управ, 27–29 вер. 2010 р., / Харківський нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків. – 2010. – С. 56-58
72. Медиковський М.О. Багатокритеріальний метод оцінювання ефективності вітроенергетичної установки / М.О. Медиковський, О.Б. Шуневич // Вісник інженерної академії України. – Київ. –2010. – Вип. 3-4. – С. 240-245.
73. Медиковський М.О. Виконання цілочисельного програмування для визначення складу вітрової електростанції / М.О. Медиковський, О.Б. Шуневич // Збірник наукових праць Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. – К. : Вид-во ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – Київ. – 2010. – Вип. 57. – С. 230-233
74. Медиковський М.О. Дослідження ефективності методів визначення вагових коефіцієнтів важливості / М.О. Медиковський, О.Б. Шуневич // Вісник Хмельницького національного університету : зб. наук.-техн. праць. – Хмельницький. – 2011. – № 5. – С. 176-182.
75. Медиковський М.О. Застосування динамічного програмування для задачі рівномірного використання вітрових електроустановок / М.О. Медиковський, В.М. Теслюк, О.Б. Шуневич // Технічна електродинаміка : зб. наук. праць. – 2014. – № 4. – С. 135-137.
76. Меньков А.В. Теоретические основы автоматизированного управления / А.В. Меньков, В.А. Острейковский. – М.: Оникс. – 2005. – 640 с.
77. Новосад В. П. Метод аналізу ієрархій як засіб обґрунтування управлінських рішень // Ефективність державного управління в контексті європейської інтеграції : матеріали щоріч. наук.-практ. конф. –2004. – Львів : ЛРІДУ НАДУ. – 2004. – ч. 1. – С. 180-183.
78. Новотарський М.А. Штучні нейронні мережі: обчислення / М.А. Новотарський, Б.Б. Нестеренко // Праці Інституту математики НАН України. – Т.51. – К.: Ін-т математики НАН України. – 2004. – 408 с.

79. Общеотраслевые руководящие методические материалы по созданию и применению автоматизированных систем управления технологическими процессами в отраслях промышленности (ОРММ — 3 АСУ ТП). — М.: Госкомитет по науке и технике. — 1988. — 191с.
80. Окулов С. Программирование в алгоритмах / С. Окулов. — 1-е. — Бином. Лаборатория знаний. — 2007. — С. 384
81. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. — М.: Финансы и статистика. — 2002. — 344 с.
82. Пападимитриу Х. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность = Combinatorial Optimization / Х. Пападимитриу, К. Стайглиц. — М.: Мир. — 1985. — 510 с.
83. Петерс Э. Фрактальный анализ финансовых рынков. Применение теории Хаоса в инвестициях и экономике / Э. Петерс. — М.: Интернет-трейдинг. — 2004. — 304 с.
84. Петренко Т. Г. Нечеткая муравьиная система для решения задачи о рюкзаке / Т. Г. Петренко, О. С. Тимчук, Д. Д. Куценко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2015. — № 5. — С. 44-47
85. Плешков С.П. Розробка математичної моделі оптимальних режимів вироблення та споживання енергії в комплексній електроенергетичній системі з відновлювальними джерелами енергії для сільськогосподарського виробництва / С.П. Плешков, В.П. Солдатенко, А.Д. Федунець // Науковий вісник ХНТУСГ : зб. наук.-техн. праць. — Харків: ХНТУСГ. — 2009. — вип. 87. — С. 25-27.
86. Полищук Л.И. Об обобщенных критериях с коэффициентами важности в задачах векторной оптимизации / Л.И. Полищук // АиТ. — №2. — 1982. — С. 55–60.
87. Рейнгольд Э. Комбинаторные алгоритмы. Теория и практика / Э. Рейнгольд, Ю. Нивергельт, Н. Део. — М.: Мир. — 1980. — 478 с
88. Руденко Ю.Н. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике / Ю.Н. Руденко, В.А. Семенова. — М.: Издательство МЭИ. — 2000. — 648 с.
89. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. — М.: Горячая линия — Телеком. — 2004. — 452 с.
90. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. — М.: Радио и связь, 1993. — 278 с.
91. Саати Т.Л. Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Л. Саати. — Москва : Радио и связь. —1991. — 224 с.

92. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях / Т.Л. Саати. – М. : Издательство ЛКИ. – 2008. – 360 с
93. Самарский А.А. Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М.: Наука. – 1989.– 429 с.
94. Сергеева Л. Н. Моделирование поведения экономических систем методами нелинейной динамики (теории хаоса) / Л. Н. Сергеева. – Запорожье: Запорожский гос. ун-т. – 2002. – 227 с.
95. Ситник В. Ф. Основи інформаційних систем: Навч. посібник. – Вид. 2-ге, перероб. і доп. / В. Ф. Ситник, Т. А. Писаревська, Н. В. Єрємона, О. С. Краєва. – К.: КНЕУ. – 2001. – 420 с.
96. Ситник В.Ф. Системи підтримки прийняття рішень: Навч. посіб. / В.Ф. Ситник – К.: КНЕУ. – 2004. – 614 с.
97. Смилянский Г.Л. Справочник проектировщика АСУ ТП / Г.Л. Смилянский, Л.З. Амлинский, В. Я. Баранов и др.; Под ред. Г.Л. Смилянского. – М.: Машиностроение. – 1983. – 527 с.
98. Соколов Е.Н. Нейроинтеллект: от нейрона к нейрокомпьютеру / Е.Н. Соколов, Г.Г. Вайтнявичус. – М.: Наука. – 1989. – С. 283.
99. Стогній Б.С. Інформатизація та інтелектуалізація електроенергетики: пріоритети та практичні доробки / Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, О.Ф.Буткевич, В.Г. Левітський. – Праці інституту електродинаміки НАН України. – 2002. – № 3 – С. 4-18.
100. Стоян О. Ю. Міжнародний досвід державного регулювання та стимулювання розвитку відновлювальної енергетики / О. Ю. Стоян // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія : Економічні науки. – 2014. – № 4. – С. 320-326
101. Стоян Ю. Теорія і методи евклідової комбінаторної оптимізації / Стоян Ю.Г., Ємець О.О. // К.: Інститут систем досліджень освіти, .–1993.– 188 с.
102. Титов Д.М. Электричне поле та лінійні електричні кола: навчальний посібник / Д.М. Титов. – Харків: Торнадо. – 1999. – 111 с.
103. Тоценко В. Г. Підтримка прийняття рішення щодо вибору методу експертного оцінювання / В. Г. Тоценко, В. В. Циганок, П. Т. Качанов // Системные исследования и информационные технологии. – 2002. – № 4. – С. 52–60
104. Трухаев, Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределенности / Р.И. Трухаев. – М.: Наука. – 1981. – 258 с.
105. Фатеев Е.М. Ветродвижатели и ветроустановки / Е.М. Фатеев. – Москва, Государственное издательство сельскохозяйственной литературы. – 1948. – 544 с.

106. Фихтенгольц Г.М. Основы математического анализа / Г.М. Фихтенгольц. – СПб.: изд-во «Лань» . – 2001. – 464 с
107. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами / В.Г. Харазов. – СПб.: Профессия. – 2009. – 592 с.
108. Хелд М. Применения динамического программирования к задачам упорядочивания / М. Хелд, Р. М. Карп // Кибернетический сборник. Вып. 9. – М.: Мир. – 1964. – С. 202–218.
109. Хо К. Spring 3 для профессионалов / Кларенс Хо, Роб Харроп. – М.: «Вильямс» . – 2012. – 880 с.
110. Цимбал Ю.В. Метод двоступеневої візуалізації в системах видобутку даних // Комп'ютерні технології друкарства: Збірник наукових праць. – Львів. – 2001. – №6. – С. 178-184.
111. Цимбал Ю.В. Застосування автоасоціативних нейронних мереж для вирішення оптимізаційних задач в електроенергетиці // Праці Міжнародної конференції з індуктивного моделювання МКІМ-2002. – Львів. – 2002. – Т.2.– С. 228-234.
112. Шандарова Е.Б. Ветроэлектростанция с регулятором мощности балласта / Е.Б. Шандарова // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: материалы 4 рос. науч.-техн. конф. – Ульяновск. – 2003. – Т.1. – Ульяновск. – 2003. – С.194–195
113. Шандарова Е.Б. Ветроэлектростанция с регулируемой ёмкостью аккумуляторной батареи / Е. Б. Шандарова // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования : материалы Всероссийской научно-технической конференции, 12-14 мая 2008 г. Томск / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – С. 12–130
114. Ширяев А. Н. Основы стохастической финансовой математики / А. Н. Ширяев.– Том 1, Факты. Модели. – М.: ФАЗИС. – 1998. – 512 с.
115. Шуневич О. Б. Нечітка логіка в моделюванні енергодинамічних режимів / О. Б. Шуневич, М. О. Медиковський // “Обробка сигналів і негауссівських процесів” : II міжнар. наук.-практ. конф, 25-29 трав. 2009 р., Черкаси : тези доп. / Черк. держ. технолог. ун-т. – Черкаси. – 2009. – С. 255–256.
116. Alencar P. A formal approach to architectural design patterns. / P. S. C. Alencar, D. D. Cowan, C. J. P. Lucena // FME '96: Industrial Benefit and Advances in Formal Methods (Eds. M.-C. Gaudel, J. Woodcock) . – 1996.– pp. 576–594
117. Alexiadis M. Wind speed and power forecasting based on spatial correlation models / M. C. Alexiadis, P. S. Dokopoulos, and H. S. Sahsamanoglou // IEEE Trans. Energy Convers.– 1991.– vol. 14, no. 3.– pp. 836–842.

118. Bailey B. Short-term wind forecasting, / B. Bailey, M. C. Brower, J. Zack // EWEC, Nice, France.– 1999.– pp. 1062–1065.
119. Barbounis T. Long-term wind speed and power forecasting using local recurrent neural network models / T. G. Barbounis, J. B. Theocharis, M. C. Alexiadis, and P. S. Dokopoulos // IEEE Trans. Energy Convers.– 2006.– vol. 21, no. 1.– pp. 273–284.
120. Barin A. Fuzzy multi-sets and multi-rules: analysis of hybrid systems concerning renewable sources with conventional and flow batteries. / Barin A, Canha LN, Magnago K, da-Rosa-Abaide A. // 15th international conference on intelligent system applications to power systems.– 2009.– pp. 210
121. Barton J. Energy storage and its use with intermittent renewable energy / Barton J., Infield D. // IEEE Transactions on Energy Conversion.– 2004.– vol. 19.– 441–448
122. Beaudin M. Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: an updated review / Beaudin M, Zareipour H, Schellenbergglabe A, Rosehart W // Energy for Sustainable Development.– 2010.–14.– pp. 302–314.
123. Benitez L. The economics of wind power with energy storage / Benitez L., Benitez P., Cornelis Van Kooten G. // Energy Economics.– 2008.– vol. 30.– 1973–1989.
124. Bo Xing Innovative Computational Intelligence: A Rough Guide to 134 Clever Algorithms. / Bo Xing, Wen-Jing Gao // Intelligent Systems Reference Library.– Volume 62.– Springer.– 2014.
125. Bosch J. Software architecture design: evaluation and transformation. / Bosch J, Molin P. // IEEE engineering of computer based systems symposium.–1999
126. Buschmann F. Pattern-Oriented Software Architecture—A System of Patterns / Buschmann F., Meunier R., Rohnert H., Sommerlad P., Stal M. // Wiley, NY.– 1996
127. Chanhom P. A new mitigation strategy for photovoltaic power fluctuation using the hierarchical simple moving average / Peerapon Chanhom, Siroroj Sirisukprasert, Natchpong Hatti // Intelligent Energy Systems (IWIES) 2013 IEEE International Workshop on.– 2013.– pp. 28-33.
128. Choi D. Advanced key management architecture for secure SCADA communications / D. Choi, H. Kim, D. Won, and S. Kim // IEEE Trans. Power Del.– 2009.– vol. 24, no. 3.– pp. 1154–1163
129. Colin R. KMA – A key management architecture for SCADA systems / R. D. Colin, C. Boyd, J. Manuel, G. Nieto // 4th Australasian Inf. Security Workshop.– 2006.– vol. 54.– pp. 138–192.
130. Divya K. Battery energy storage technology for power systems—An overview / Divya K., Ostergaard J. // Electric Power Systems Research.– 2009.– vol. 79.– pp. 511–520

131. Dorigo M. Ant colonies for the traveling salesman problem / M. Dorigo, L.M. Gambardella // *BioSystems*. – 1997. – vol. 43. – pp. 73-81.
132. Dorigo M. Ant System: optimization by colony of cooperating agents / M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colomi // *IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics*. Part B. – 1996. – Vol. SMC – 26. – pp. 29-41.
133. Dorigo M. The Ant System: An Autocatalytic Optimizing Process. / Dorigo M., V. Maniezzo, A. Colomi // *Technical Report No. 91-016 Revised*, Politecnico di Milano, Italy.– pp 34
134. Elman, J. Finding structure in time. // *Cognitive Science*.– 1990.– pp. 179-211
135. Esmaili A. Energy storage for short-term and long-term wind energy support / Esmaili A, Nasiri A. // *36th annual conference on IEEE industrial electronics society*.– 2010.– pp. 3281–3286.
136. Fahlman S. The Cascade-Correlation Learning Architecture / Fahlman S.E., Labiere C. // *Advances in Neural Information Processing Systems*.– 1990.– pp. 524-532.
137. Faias S. An overview on short and long-term response energy storage devices for power systems applications / Faias S, Santos P, Sousa J, Castro R // *International conference on renewable energies and power quality*.– 2008.–pp 45-56
138. Frost R. Modular and Efficient Top-Down Parsing for Ambiguous Left-Recursive Grammars / Frost Richard, Hafiz Rahmatullah, and Callaghan Paul // *10th International Workshop on Parsing Technologies (IWPT), ACL-SIGPARSE*.– 2007.– Prague.– pp. 109 – 120.
139. Gamma E. Design Patterns: Elements of Reusable ObjectOriented Software / Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissides, J. // *Addison-Wesley*.– 1995.
140. Garsia-Martinez C. A taxonomy and an empirical analysis of multiple objective ant colony optimization algorithms for the bi-criteria TSP / C. Garsia-Martinez, O. Cordon, F. Herrera // *European Journal of Operational Research*. – 2007. – vol. 180. – pp. 116-148.
141. Georgilakis P. Technical challenges associated with the integration of wind power into power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2008.–vol. 12– pp. 852–863
142. Giebel G. The State of the Art in Short-Term Prediction of Wind Power: A Literature Overview / Giebel, Gregor; Brownsword, Richard; Kariniotakis, George; Denhard, Michael; Draxl, Caroline . – *ANEMOS.plus*. – 2011. – 109 p.
143. Hadjipaschalis I. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. / Hadjipaschalis I, Poullikkas A, Efthimiou V. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2009. – Vol. 13. – pp.1513–1522.
144. Hall P. Energy-storage technologies and electricity generation./ Hall P., Bain E. // *Energy Policy*.– 2008.– vol. 36. – pp 4352–4355.



145. Hiroki Y. Can Batteries Save Embattled Wind Power // 2008. – p. 43
146. Holland J. Adaptation in Natural and Artificial Systems / J. Holland. Ann Arbor // MI: The University of Michigan Press, –1975. – 2nd ed. Boston, MA: MIT Press, 1992.– pp 34-44
147. Ijure V. Security issues in SCADA networks / V. M. Ijure, S. A. Laughter, and R. D. Williams // in Comput. Security.– 2006.– vol. 25.– pp. 498–506
148. Jun Liu Using the OPC Standard for Real-Time Process Monitoring and Control. / Jun Liu, Khiang Wee Lim, Weng Khuen Ho, Kay Chen Tan, Arthur Tay, Srinivasan, R. // IEEE Software. – 2005. – vol. 22(6).– pp.54–59.
149. Kaldellis J. Optimum energy storage techniques for the improvement of renewable energy sources-based electricity generation economic efficiency / Kaldellis J, Zafirakis D. // Energy.– 2007.– vol. 32.– pp. 2295–2305.
150. Karniotakis G. Wind power forecasting using advanced neural network models / G. Karniotakis, G. S. Stavrakakis, E. F. Nogaret // IEEE Transactions Energy Convers.– 1996.– vol. 11, no. 4.– pp. 762–767
151. Kondoh J. Electrical energy storage systems for energy networks. / Kondoh J, Ishii I., Yamaguchi H., Murata A., Otani K., Sakuta K. // Energy Conversion and Management – 2000.– vol. 41.– pp.1863–1874
152. Kravchyshyn V. Modification of the dynamic programming method for determining active structure of wind power plant / V. Kravchyshyn, M. Medykovsky, R. Melnyk // JCPEE.– 2016.– Volume 6, Number 2.– pp. 83-90
153. Kravchyshyn V. Optimization of wind farm structure control / V. Kravchyshyn, M. Medykovsky, R. Melnyk, M. Dilai // Selected Papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2017, September 5-8 Lviv, Ukraine : Advances in Intelligent Systems and Computing II.– 2017.– pp 320-333
154. Landberg L. Short-term prediction – An overview / L. Landberg, G. Giebel, H. A. Nielsen, T. Nielsen, H. Madsen // Wind Energy (Special Review Issue on Advances in Wind Energy) .– 2003.– vol. 6, no. 3, pp. 273–280
155. Lange J. Umstieg auf OPC Unified Architecture: Sanfte Migration oder harter Uebergang?– SPS Magazin.– vol. 20.– 2007.– pp.122-126
156. Luo F. A novel short-term dispatch scheme for wind farm with battery energy storage system / F. J. Luo, Zhaoyang Dong, Y. Y. Chen, Ke Meng, Guo Chen, Huiqiao Tian, Kit Po Wong // Power and Energy Society General Meeting (PES), IEEE .– 2013.– pp. 1-5
157. Mahnke W. OPC Unified Architecture – The future standard for communication and information modeling in automation / W. Mahnke, S.H. Leitner // ABB Review 3/2009 .– 3/2009.– pp. 56-61

158. Mahnke W. OPC Unified Architecture / W. Mahnke, S.H. Leitner, M. Damm. – 2009. – Springer–Verlag Berlin Heidelberg.– 351 p.
159. Mak G. Spring MVC Framework. Spring Recipes.– 2008.– pp. 321–393. doi:10.1007/978-1-4302-0623-1\_10
160. Martello S. Knapsack problems: algorithms and computer implementations / Martello S., Toth P. // John Wiley and Sons Ltd.– 1990.– vol.29, n.50.– p. 296.
161. McDowall J. Integrating energy storage with wind power in weak electricity grids. Journal of Power Sources.– 2006.– vol. 162.– pp. 959–64.
162. Medykovskyu M. Optimal Choice of Wind Turbines Combination Based on Customer’s Requirements / M. Medykovskyu, O. Shunevych // “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп’ютерної інженерії” : 10-та міжнар. наук.-техн. конф, 23-27 лют. 2010 р., Львів-Славсько : тези доп. / Нац. ун-т “Львівська політехніка”.– 2010. – p. 319.
163. Mudi R. A self-tuning fuzzy PI controller / R.K. Mudi, N.R. Pal // Int. Jo. Fuzzy sets and systems. – № 115. – 2000. – p. 327 – 378
164. Neuberger N. Состояние и перспективы развития ветроэнергетики / N.Neuberger, E.Nolle, Г.Пивняк, А. Бешта // Проблемы автоматизированного электропривода: материалы XVIII междун. конф. Теория и практика”.– 2011.– 326 с.
165. Nielsen T. Experiences with statistical methods for wind power prediction / T. S. Nielsen, H. Madsen, Tofting // in Proc. Global Windpower Conf. Exhib., Paris, France.– Apr. 2–5, 2002.– p. 117
166. Nielsen T. Statistical methods for predicting wind power / T. S. Nielsen and H. Madsen // in Proc. EWEC, Dublin, Ireland.– 1997.– pp. 233-237
167. Norvig P. Techniques for Automatic Memoization with Applications to Context-Free Parsing // Computational Linguistics.– 1991.– Т. 17, № 1.– pp. 91–98.
168. Pinson P. Wind power forecasting using fuzzy neural networks enhanced with on-line prediction risk assessment / P. Pinson and G. Kariniotakis // in Proc. IEEE Power Tech Conf., Bologna, Italy.– Jun. 23–26, 2003.– vol. 2.– p. 8.
169. Ribeiro P. Energy storage systems for advanced power applications / Ribeiro P, Johnson B, Crow M, Arsoy A, Liu Y // Proceedings of the IEEE.– 2001.– vol. 89.– pp. 1744–1756
170. Rohjans S. OPC UA and CIM: Semantics for the smart grid / Rohjans, S., Uslar, M., Juergen Appelrath, H. // IEEE PES T&D.– 2010.–pp. 196
171. Saaty T. An eigenvalue allocation model for prioritization and planning. (Working paper). Energy Management and Policy Center. University of Pennsylvania.– 1972.– 199 p.
172. Saaty T. Multicriteria Decision Making: The Analytical Hierarchy Process.– New York: McGraw Hill.– 1990.– 502 p.

173. Sawyer S. Global Wind Energy Council. / Sawyer Steve, Teske Sven, Fried Lauha, Shukla // Global wind energy outlook. – 2017.– 230 p.
174. Schneider M. The World Nuclear Industry Status Report 2014 / Mycle Schneider, Antony Froggatt, Yurika Ayukawa, Shaun Burnie, Raffaele Piria, Steve Thomas, Julie Hazemann// Paris, London, Washington, D.C.– 2014.– 289p.
175. Schneider M. The World Nuclear Industry Status Report 2015 / Mycle Schneider, Antony Froggatt, Julie Hazemann, Tadahiro Katsuta, M.V. Ramana, Steve Thomas . – Paris, London. – 2015.– 330p.
176. Schneider M. The World Nuclear Industry Status Report 2016 / Mycle Schneider, Antony Froggatt, Julie Hazemann, Tadahiro Katsuta, M.V. Ramana . – Paris, London, Tokyo. – 2016 .– 278p/
177. Sharad W. Micro Wind Power Generator With Battery Energy Storage for Critical Load / Sharad.W. Mohod, Mohan V. Aware // Systems Journal IEE.– 2012.– vol. 6.– pp. 118-125
178. Sideratos G. An advanced statistical method for wind power forecasting / G. Sideratos and N. D. Hatziargyriou // IEEE Trans. Power Syst.– 2007.– vol. 22, no. 1.– pp. 258–265
179. Wang X. Determination of battery storage capacity in energy buffer for wind farm / Wang, X.Y., Mahinda Vilathgamuwa, D., Choi, S.S. // IEEE Trans. Energy Convers.– 2008.– vol. 23/3.– pp. 868–878
180. Wee K. Design of a wind turbine - battery energy storage scheme to achieve power dispatchability / Wee K., Choi S., Vilathgamuwa D. // IPEC .– 2010 Conference Proceedings.–, pp. 1217-1222
181. Wei Li Real–Time Simulation of a Wind Turbine Generator Coupled With a Battery Supercapacitor Energy Storage System / Wei Li, Géza Joos, Jean Belanger // IEEE Transactions on Industrial Electronics.– 2010.– Volume 57/4.– pp. 320-332
182. Yoshimoto K. Analysis of data obtained in demonstration test about battery energy storage system to mitigate output fluctuation of wind farm / Yoshimoto K, Nanahara T, Koshimizu G. // CIGRE/IEEE PES joint symposium integration of wide-scale renewable resources into the power delivery system.– 2009.– pp 145-156
183. Yu P. Multiple criteria decision making: Concepts, techniques, and extensions, Plenum Press.– New York–London.–1985.– 360 p.
184. Zeng J. Use of battery energy storage system to improve the power quality and stability of wind farms / J. Zeng, B. Zhang, C. Mao, and Y. Wang, // in Proc. Int. Conf. Power Syst. Technol.– 2006.– pp. 1–6.
185. Zhang Y. Cooperative Dispatch of BESS and Wind Power Generation Considering Carbon Emission Limitation in Australia / Yang Zhang, Herbert Ho-Ching Iu,

- Tyrone Fernando, Fang Yao, Kianoush Emami // Industrial Informatics IEEE.– 2015.– vol. 11.– pp. 1313-1323
186. Maniezzo V. The ant system applied to the quadratic assignment problem / V. Maniezzo, A. Colomi, M. Dorigo. – Bruxelles : Universite Libre de Bruxelles. – 1994. – 24 p.
  187. ДП «НЕК «УКРЕНЕРГО», Правила ринку електричної енергії України, 2017, [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2017/02/Pravyla-Rynku.pdf>
  188. Карта вітрів України, [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.ecosvit.net/ua/vitrogeneratori>
  189. Lazard Ltd. Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis – Version 11.0 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.lazard.com/media/450337/lazard-levelized-cost-of-energy-version-110.pdf>
  190. Sellarès T. The Model View Controller: a Composed Pattern. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://ima.udg.edu/~sellares/EINF-ES1/MVC-Toni.pdf>
  191. Wind in power. 2015 European statistics. European / Wind Energy Association.– 2016. – [Електронний ресурс] –[
  192. World Wind Energy Association Half-year Report 2016 / World Wind Energy Association. – Tech. Rep. – 2016. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://www.wwindea.org/wp-content/uploads/filebase/market\\_reports/Half-year\\_Report\\_WWEA\\_2016.pdf](http://www.wwindea.org/wp-content/uploads/filebase/market_reports/Half-year_Report_WWEA_2016.pdf)

## ДОДАТОК А

### Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

1. Kravchyshyn V. Optimization of wind farm structure control / V. Kravchyshyn, M. Medykovskyy, R. Melnyk, M. Dilai // *Advances in Intelligent Systems and Computing* II.– Selected Papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2017.– Springer.– Vol. 689.– pp. 320-333
2. Kravchyshyn V. Modification of the dynamic programming method for determining active structure of wind power plant / V. Kravchyshyn, M. Medykovskyy, R. Melnyk // *Journal of Computational Problems of Electrical Engineering* 2016.– Volume 6, Number 2.– pp. 83-90
3. Кравчишин В.С. Дослідження режимів управління енергодинамічними процесами в системах електропостачання за наявності акумулюючих елементів / Кравчишин В.С., Медиковський М.О., Мельник Р.В., Шуневич О.Б. // *Науковий вісник НЛТУ України*, 2016.– т. 26, № 7 .– с. 291 – 298
4. Кравчишин В. С. Моделювання енергетичного потенціалу вітрової електричної станції / В. С. Кравчишин, М. О. Медиковський, М. О. Галушак // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Інформаційні системи та мережі.*– 2016.– № 854.– с.80-87
5. Medykovskyy M. Analysis and modeling of load parameters of wind power station / M. Medykovskyy, V. Kravchyshyn, O. Shunevych // *ECONTECHMOD. AN INTERNATIONAL QUARTERLY JOURNAL* .– Lublin – Rzeszow .– 2015.– Vol. 04, No. 2, pp. 19–24
6. Медиковський М. О. Методи та алгоритми опрацювання стратегічних даних / М. О. Медиковський, О. І. Цмоць, В. С. Кравчишин // *Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова*. - 2013. - Вип. 69. - С. 131-140
7. Медиковський М. О. Методи оперативного опрацювання даних в інтегрованих системах автоматизованого управління енергоефективністю регіону /

М. О. Медиковський, І. Г. Цмоць, В. С. Кравчишин // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова “Моделювання та інформаційні технології”.– 2013.– Вип. 68.– с. 176-183

8. Кравчишин В.С. Управління вітровою електричною станцією за наявності акумулюючого елемента / Кравчишин В.С., Медиковський М.О. // Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту ISDMCI'2016 : зб. наук. пр. міжнар. наук. конф.– 24–28 трав. 2016.– Залізний Порт, Україна.– с. 83-85

9. Medykovskyy M. Structure optimization of wind power system / Medykovskyy Mykola, Shunevych Oleh, Kravchyshyn Vitaliy // papers of the Xth International Conference “Perspective technologies and methods in mems design”.– MEMSTECH-2014.– Lviv: NULP.– 2014.– p. 111

10. Медиковський М. Моделювання вхідних параметрів системи управління вітровою електростанцією / М. Медиковський, В. Кравчишин, О. Шуневич // матеріали XI Міжнародної наукової конференції "Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2015)", Залізний Порт, Україна, 25-28 травня 2015.– с. 113-115

11. Kravchyshyn V. Analysis of modeling methods of wind energy potential of a region / Vitalii Kravchyshyn, Mykola Medykovskyy // The papers of 11th International Scientific and Technical Conference “Computer Sciences and Information Technologies” (CSIT'2016), September 6-10.– 2016.– Lviv, Ukraine.– pp. 175-178

12. Kravchyshyn V. Modeling of input load's parameters of control system of wind power system / Vitaliy Kravchyshyn, Mykola Medykovskyy, Oleh Shunevych // 16th International conference “Computational Problems of Electrical Engineering”.– CPEE 2015.– Lviv Polytechnic National University.– Lviv, Ukraine.– 2-5 September 2015.– pp.116-117

13. Kravchyshyn V. Methods of prediction of wind speed / Vitaliy Kravchyshyn, Mykola Medykovskyy, Oleh Shunevych // The papers of 9th International Scientific and Technical Conference “Computer Sciences and Information Technologies” (CSIT'2014), November 18-22, 2014, Lviv, Ukraine.– pp. 160-161

14. Kravchyshyn V. Using of neural networks in problems of forecasting wind speed values / Vitalii Kravchyshyn, Mykola Medykovskyj // Автоматика – 2017: XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління.– м. Київ, Україна.– 13–15 вересня 2017 року: тези конференції. Київ. 2017.– с. 183-185
15. Кравчишин В.С Інтелектуальні засоби прогнозування швидкості вітру / Кравчишин В.С, Медиковський М.О., Шуневич О.Б. // Матеріали другої міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК” – Київ: НУБІП, 2014.– с. 34
16. Медиковський М. О. Особливості оперативної обробки даних в інформаційно-аналітичній системі оцінювання енергоефективності промисловості регіону / М. О. Медиковський, І. Г. Цмоць, В. С. Кравчишин // Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту ISDMCI'2013: зб. наук. пр. міжнар. наук. конф., 20–24 трав. 2013 р., Євпаторія, Україна / Ін-т кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України. – Херсон, 2013. – С. 207–209

## ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Результати статистичного аналізу швидкості вітру для м. Дрогобич

$v$ (м/с)	$dN/dv$	$\Phi_v$	$\Phi_{v>v'}$	$P_v$	$P_v \cdot \Phi_v$	Вейбула	Логнормальний	Гамма
1	823	0,2933	1,0000	0,65	0,1906	0,1965	0,2011	0,2072
2	576	0,2053	0,7067	5,20	1,0674	0,1974	0,2768	0,2134
3	379	0,1351	0,5014	17,55	2,3704	0,1663	0,1991	0,1719
4	259	0,0923	0,3664	41,60	3,8398	0,1273	0,1251	0,1252
5	219	0,0780	0,2741	81,25	6,3413	0,0912	0,0764	0,0863
6	280	0,0998	0,1960	140,40	14,0100	0,0621	0,0469	0,0574
7	83	0,0296	0,0962	222,95	6,5947	0,0405	0,0292	0,0373
8	56	0,0200	0,0666	332,80	6,6418	0,0254	0,0185	0,0238
9	84	0,0299	0,0467	473,85	14,1851	0,0155	0,0120	0,0150
10	7	0,0025	0,0167	650,00	1,6215	0,0091	0,0079	0,0093
11	29	0,0103	0,0143	865,15	8,9413	0,0053	0,0053	0,0058
12	0	0,0000	0,0039	1123,20	0,0000	0,0029	0,0036	0,0035
13	8	0,0029	0,0039	1428,05	4,0714	0,0016	0,0025	0,0022
14	2	0,0007	0,0011	1783,60	1,2713	0,0009	0,0018	0,0013
15	1	0,0004	0,0004	2193,75	0,7818	0,0005	0,0013	0,0008

Таблиця Б.2 – Результати статистичного аналізу швидкості вітру для м. Івано-Франківськ

$v$ (м/с)	$dN/dv$	$\Phi_v$	$\Phi_{v>v'}$	$P_v$	$P_v \cdot \Phi_v$	Вейбула	Логнормальний	Гамма
1	706	0,2423	1,0000	0,65	0,1575	0,1563	0,1184	0,1578
2	267	0,0916	0,7577	5,20	0,4765	0,1977	0,2767	0,2226
3	703	0,2412	0,6661	17,55	4,2339	0,1883	0,2315	0,2006
4	478	0,1640	0,4248	41,60	6,8239	0,1530	0,1507	0,1504
5	304	0,1043	0,2608	81,25	8,4763	0,1107	0,0909	0,1020
6	176	0,0604	0,1565	140,40	8,4799	0,0729	0,0538	0,0649
7	119	0,0408	0,0961	222,95	9,1047	0,0442	0,0319	0,0395
8	79	0,0271	0,0553	332,80	9,0224	0,0249	0,0191	0,0233
9	29	0,0100	0,0281	473,85	4,7157	0,0131	0,0117	0,0134
10	30	0,0103	0,0182	650,00	6,6918	0,0065	0,0072	0,0076
11	17	0,0058	0,0079	865,15	5,0472	0,0030	0,0046	0,0042
12	2	0,0007	0,0021	1123,20	0,7709	0,0013	0,0029	0,0023
13	4	0,0014	0,0014	1428,05	1,9603	0,0005	0,0019	0,0013
14	0	0,0000	0,0000	1783,60	0,0000	0,0002	0,0013	0,0007
15	0	0,0000	0,0000	2193,75	0,0000	0,0001	0,0008	0,0004



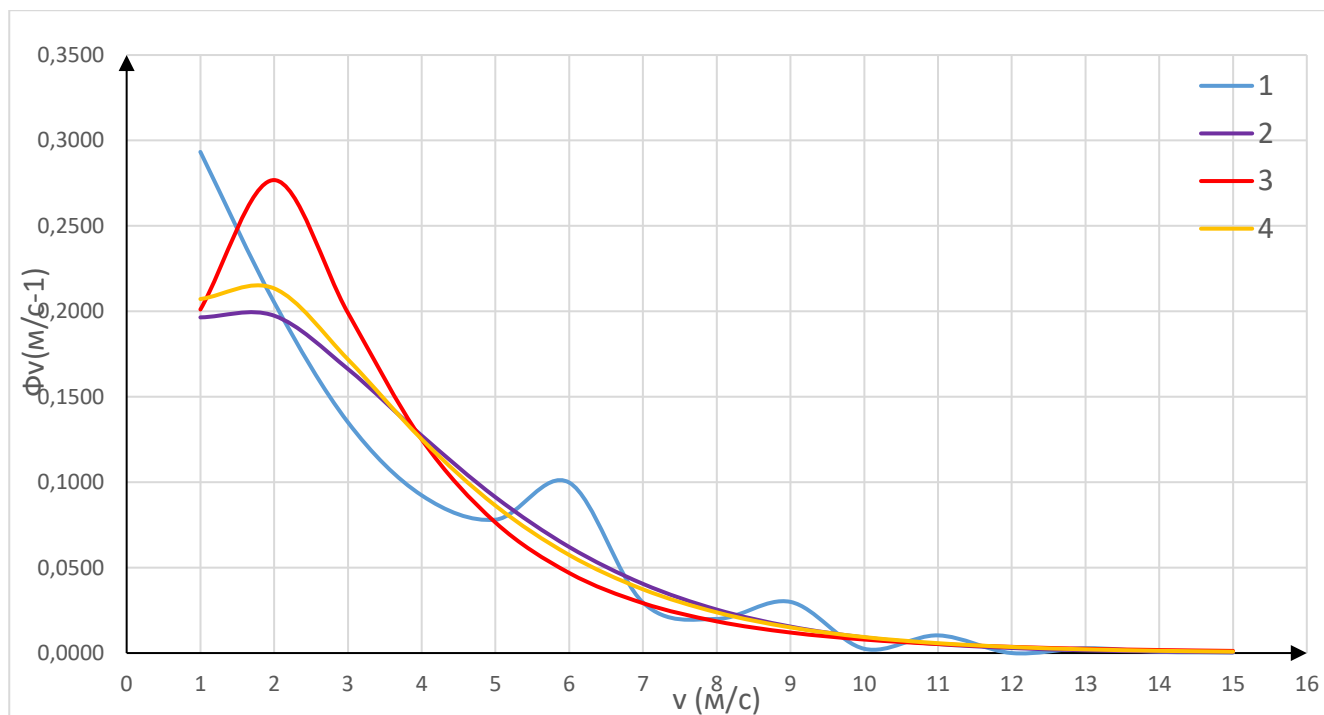


Рисунок – Б.1. Розподіл повторюваності швидкості вітру; 1 – диференціальний розподіл, 2 – розподіл Вейбула, 3 – логнормальний розподіл, 4 – Гамма розподіл для міста Дрогобич

Річна густина функції розподілу енергії вітру для міста Дрогобич має максимум при значенні швидкості вітру 9 м/с, як видно з рисунку 2.9, тобто при швидкості вітру що в більш ніж в 9 разів перевищує найбільш вірогідну.

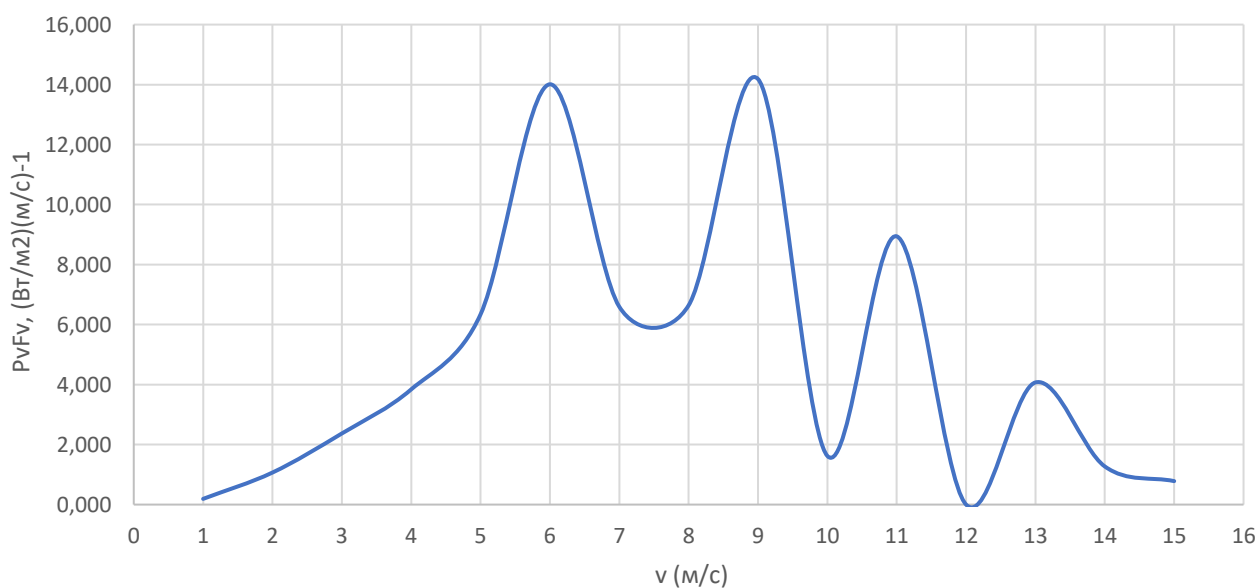


Рисунок – Б.2. Розподіл енергії вітру залежно від його швидкості для міста Дрогобич

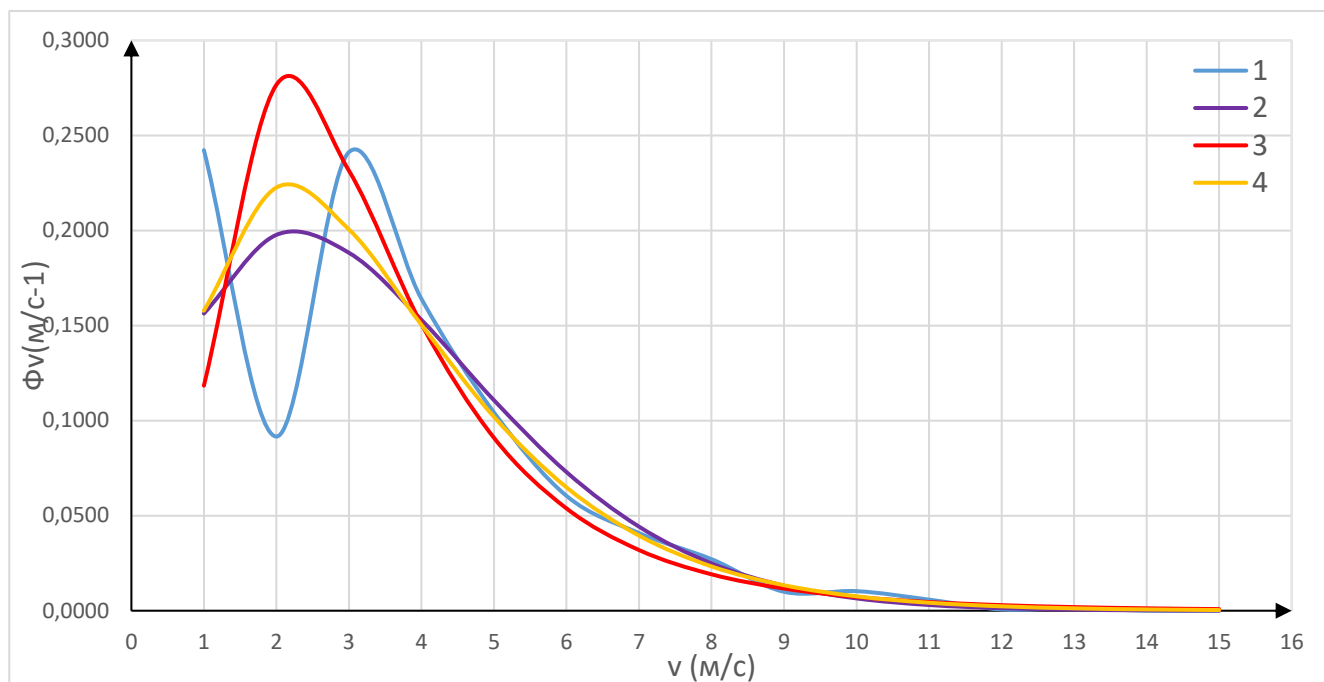


Рисунок – Б.3 Розподіл повторюваності швидкості вітру; 1 – диференціальний розподіл, 2 – розподіл Вейбула, 3 – логнормальний розподіл, 4 – Гамма розподіл для міста Івано-Франківськ

Річна функція енергії вітру для міста Івано-Франківськ має максимум при значенні швидкості вітру в 7 м/с, як видно з рисунку 2.11, тобто при швидкості вітру що в більш ніж в 7 рази перевищує найбільш вірогідну.

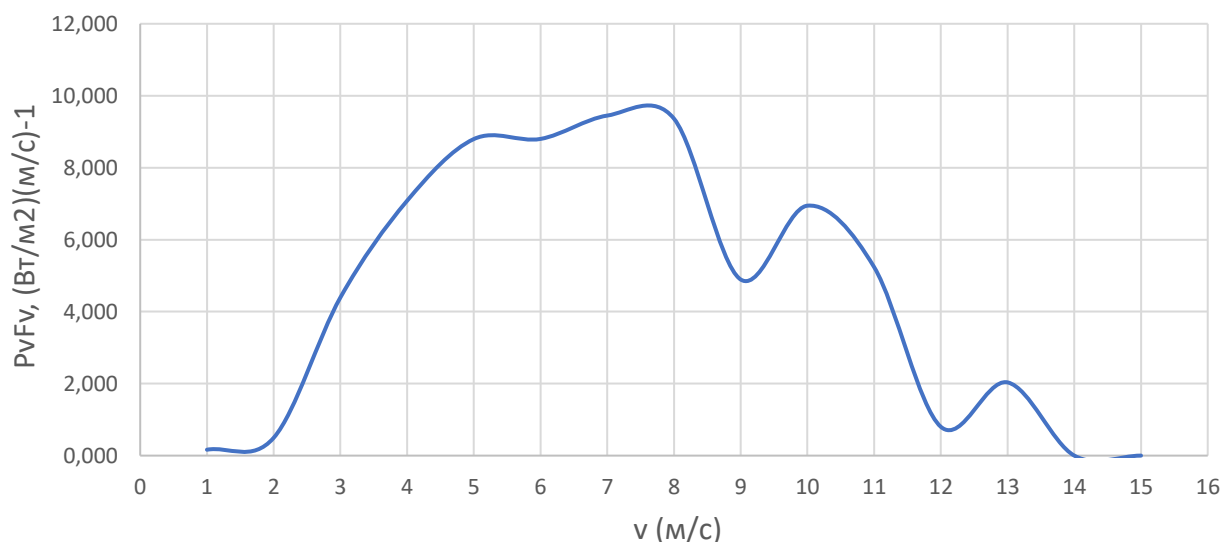


Рисунок – Б.4. Розподіл енергії вітру залежно від його швидкості для міста Івано-Франківськ

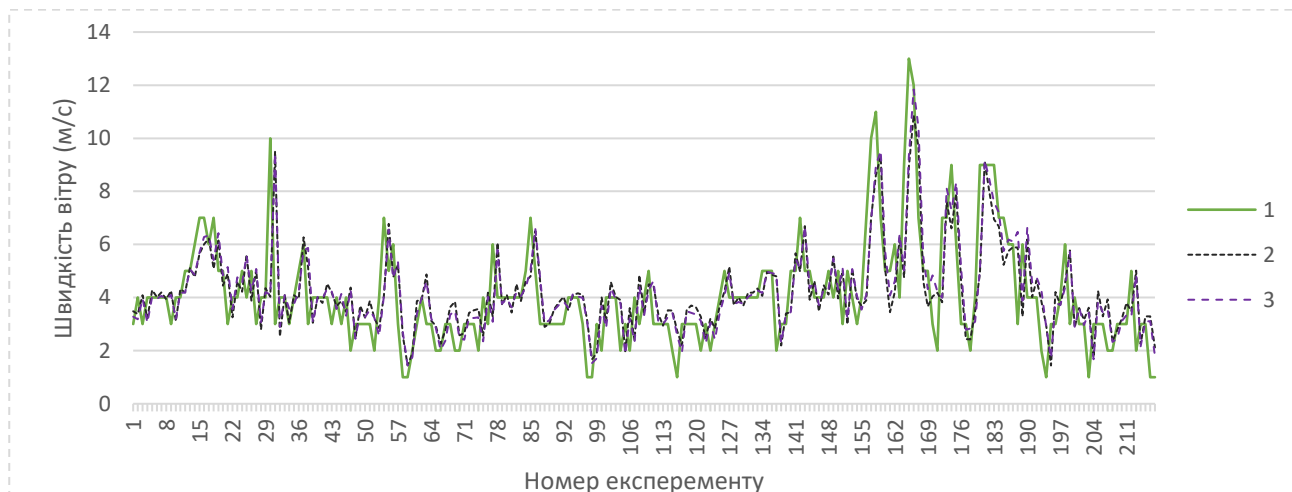


Рисунок – Б.5 Динаміка швидкості вітру на реальній та прогнозованій вибірках для міста Асканія-Нова, для періоду 1-30 червня 2015 року (1 –еталонні значення швидкості вітру, 2- прогноз, отриманий в результаті першого типу експерименту, 3 - прогноз, отриманий в результаті другого типу експерименту)

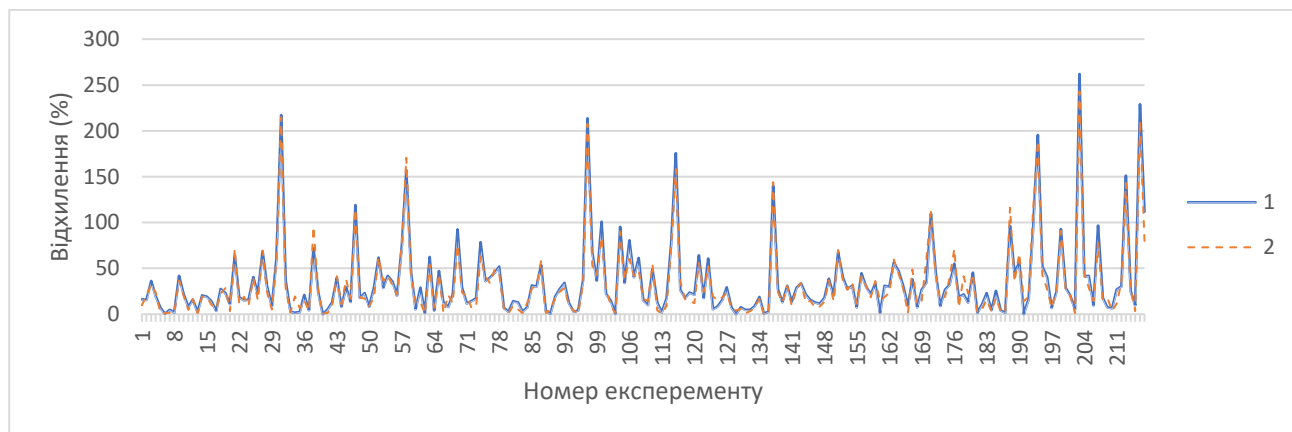


Рисунок – Б.6 Відхилення прогнозованих значень швикості вітру від реальних у відсотках для міста Асканія-Нова, для періоду 1-30 червня 2015 року (1- перший експеримент, 2 - другий експеримент)

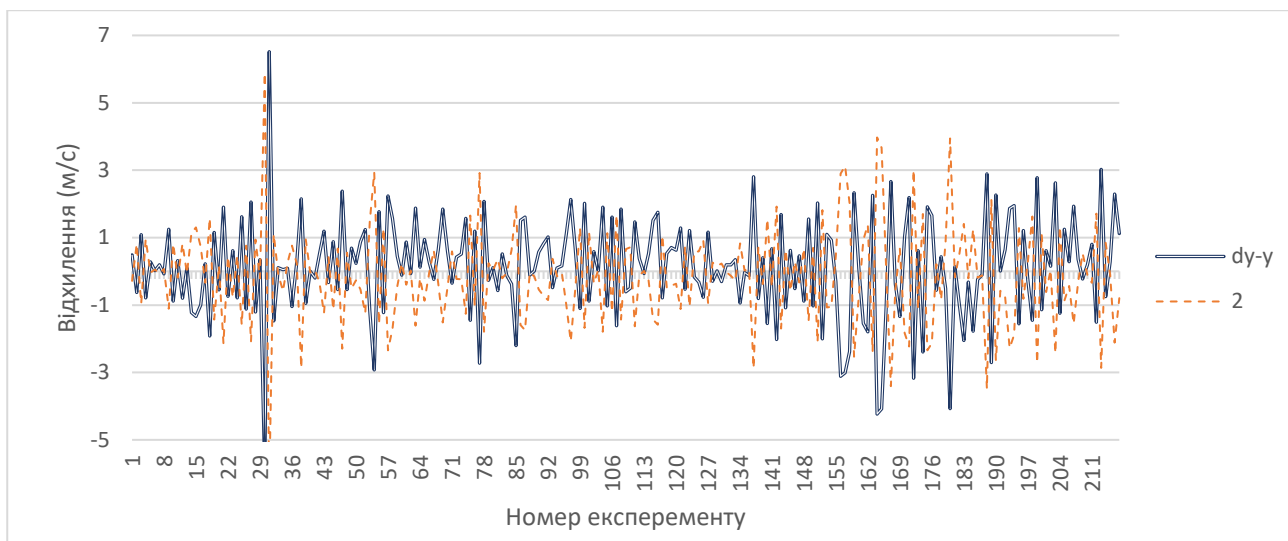


Рисунок – Б.7 Динаміка абсолютних відхилень прогнозованих значень швидкості вітру від реальних для міста Асканія-Нова, для періоду 1-30 червня 2015 року (1- перший експеримент, 2 - другий експеримент)

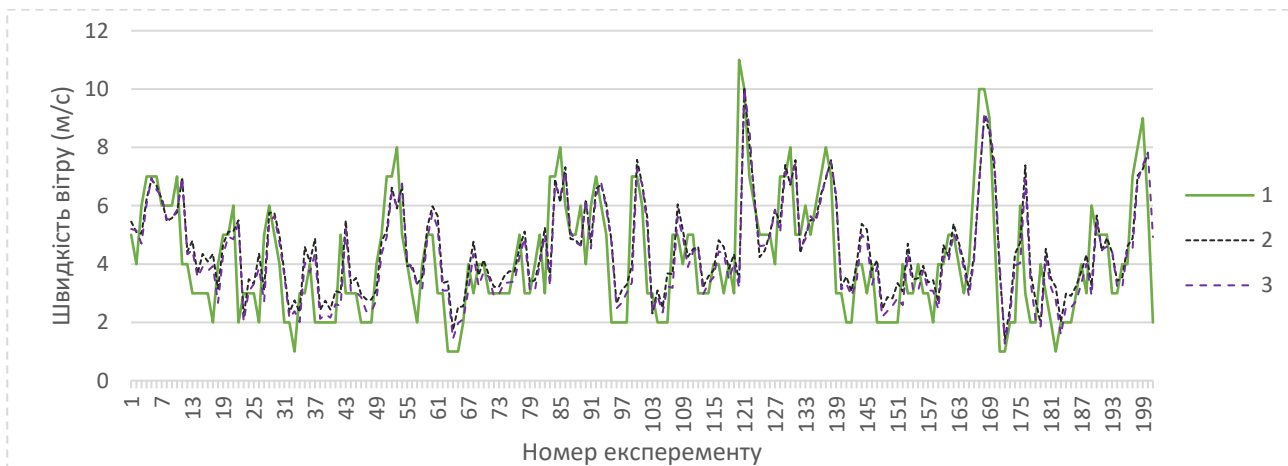


Рисунок – Б.8 Динаміка швидкості вітру на реальній та прогнозованій вибірках для міста Асканія-Нова, для періоду 1-30 вересня 2015 року (1 – еталонні значення швидкості вітру, 2- прогноз, отриманий в результаті першого типу експерименту, 3 - прогноз, отриманий в результаті другого типу експерименту )



Рисунок – Б.9 Відхилення прогнозованих значень швидкості вітру від реальних у відсотках для міста Асканія-Нова, для періоду 1-30 вересня 2015 року (1- перший експеримент, 2 - другий експеримент)

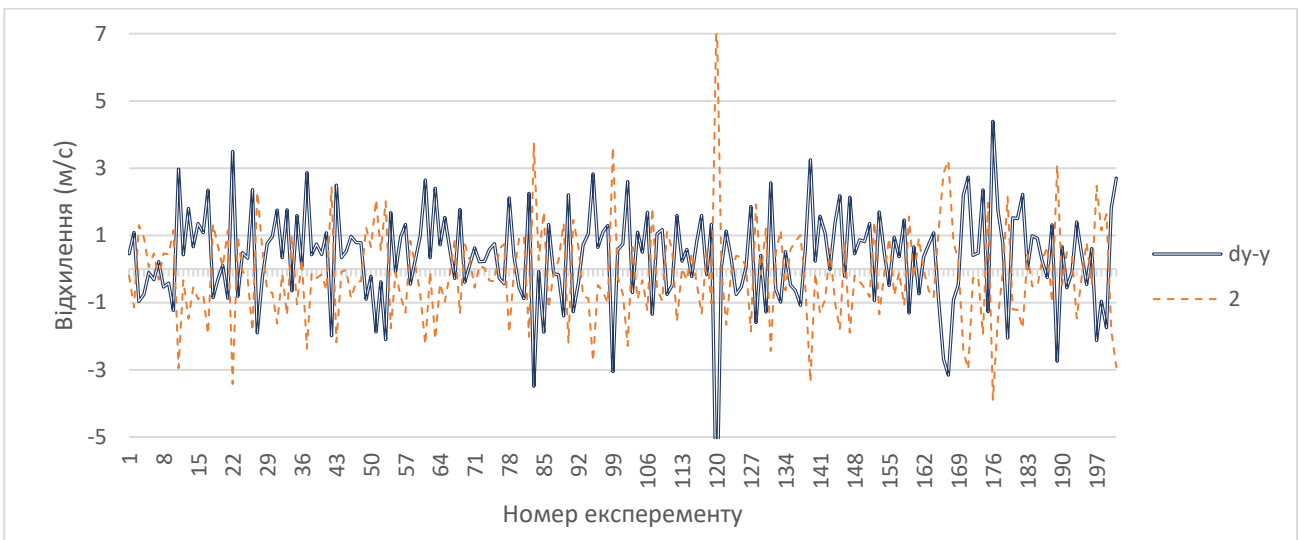


Рисунок – Б.10 Динаміка абсолютних відхилень прогнозованих значень швидкості вітру від реальних для міста Асканія-Нова, для періоду 1-30 вересня 2015 року (1- перший експеримент, 2 - другий експеримент)

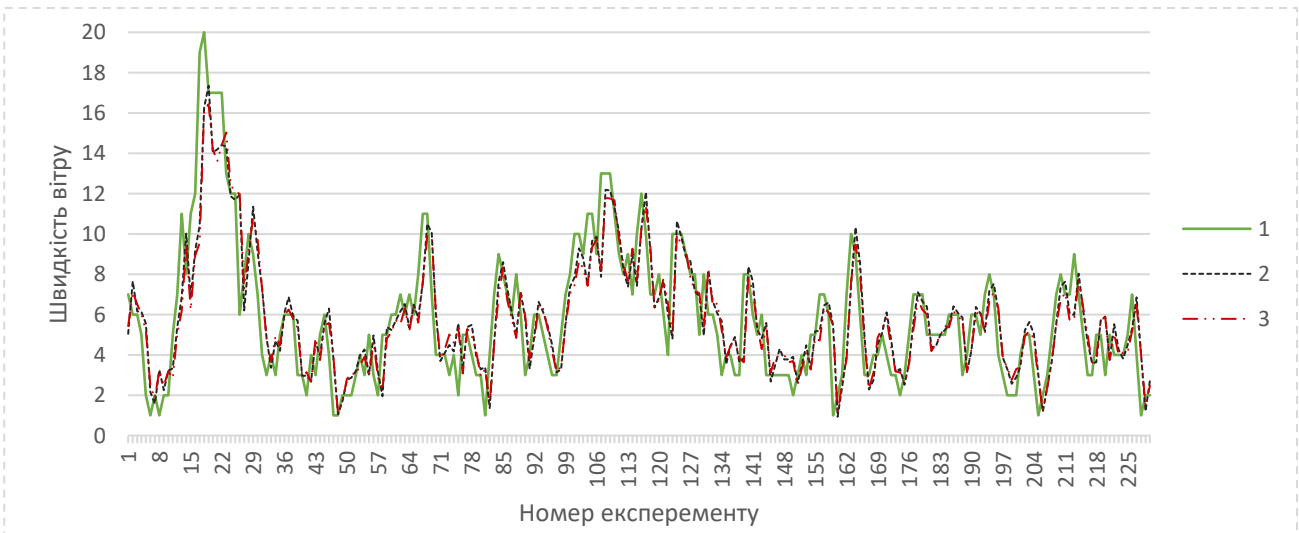


Рисунок – Б.11 Динаміка швидкості вітру на реальній та прогнозованій вибірках для міста Асканія-Нова, для періоду 1-31 грудня 2015 року (1 –еталонні значення швидкості вітру, 2- прогноз, отриманий в результаті першого типу експерименту, 3 - прогноз, отриманий в результаті першого типу експерименту )

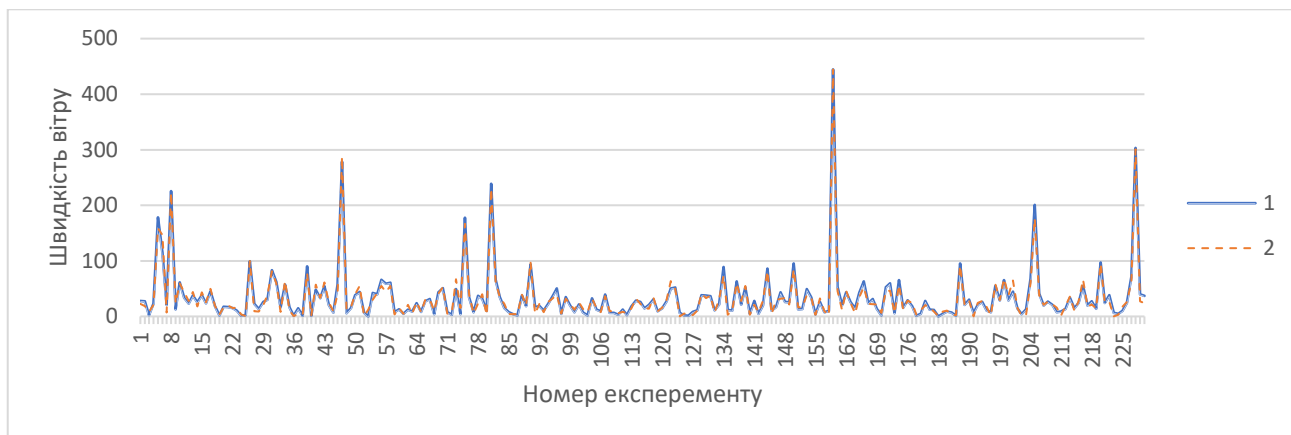


Рисунок – Б.12 Відхилення прогнозованих значень швикості вітру від реальних у відсотках для міста Асканія-Нова, для періоду 1-31 грудня 2015 року (1- перший експеримент, 2 - другий експеримент)

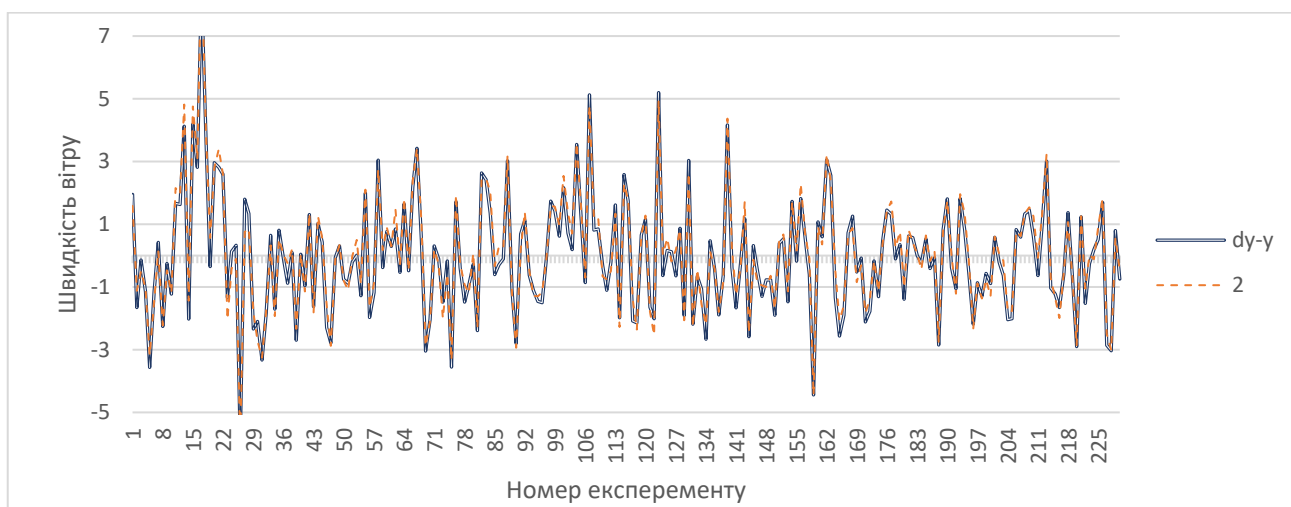


Рисунок – Б.13 Динаміка абсолютних відхилень прогнозованих значень швидкості вітру від реальних для міста Асканія-Нова, для періоду 1-31 грудня 2015 року (1- перший експеримент, 2 - другий експеримент)

## ДОДАТОК В

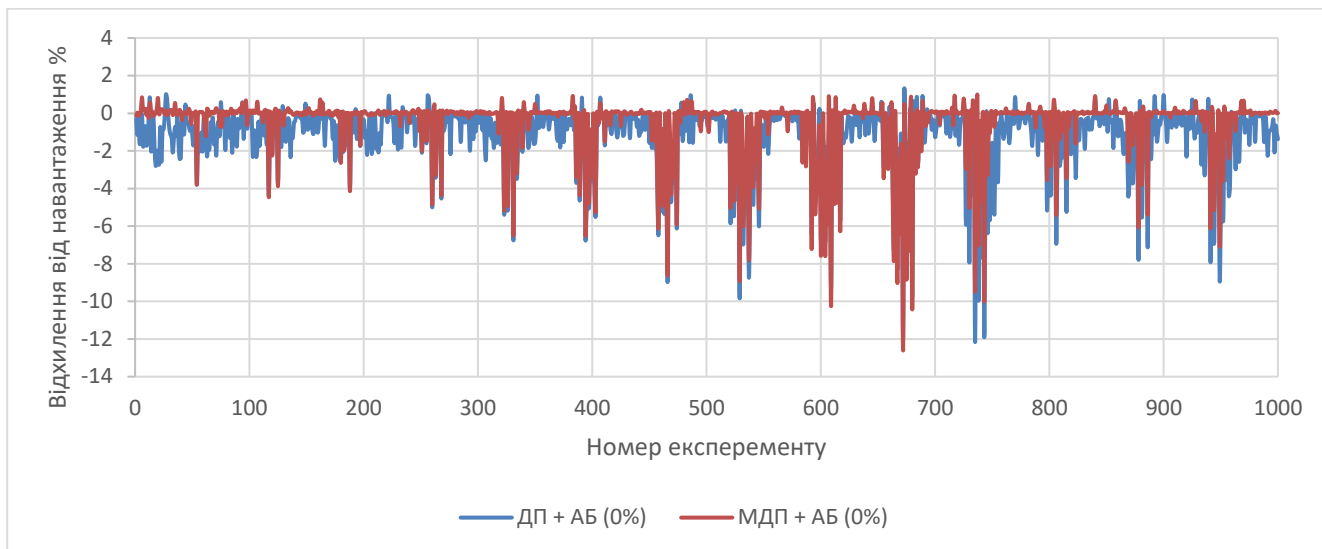


Рисунок – В.1 Динаміка відхилення від навантаження споживачів для МДП та КДП без використання енергоакumuлюючого елемента в структурі

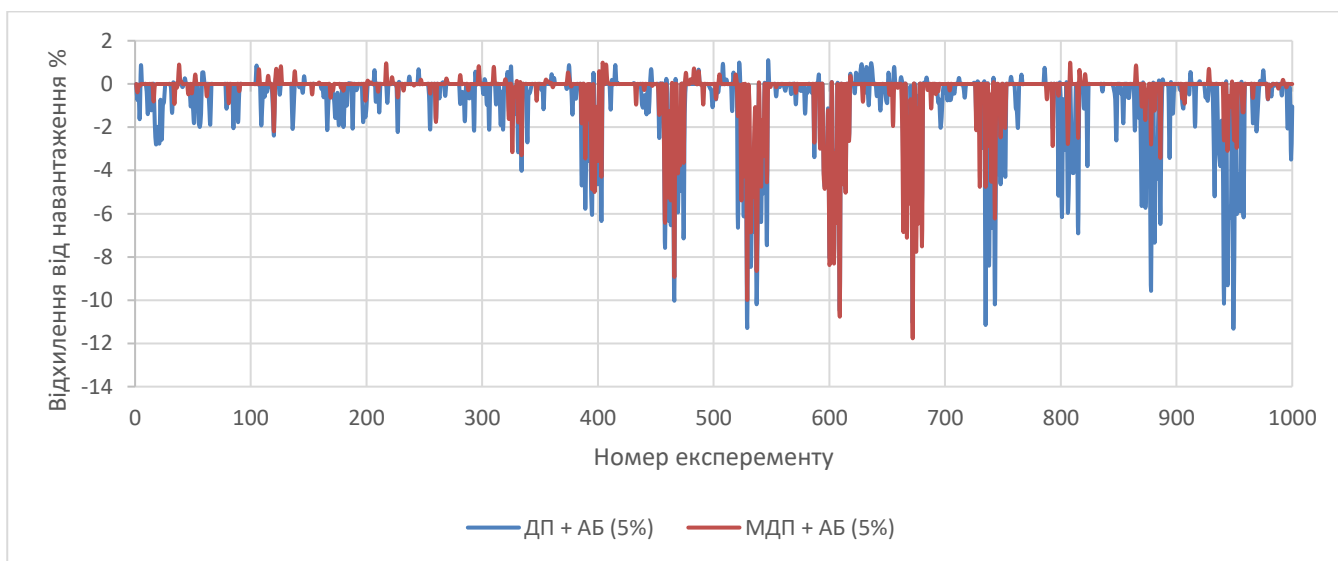


Рисунок – В.2 Динаміка відхилення від навантаження споживачів для МДП та КДП з використанням АБ енергетичною ємністю 5% номінальної потужності ВЕС

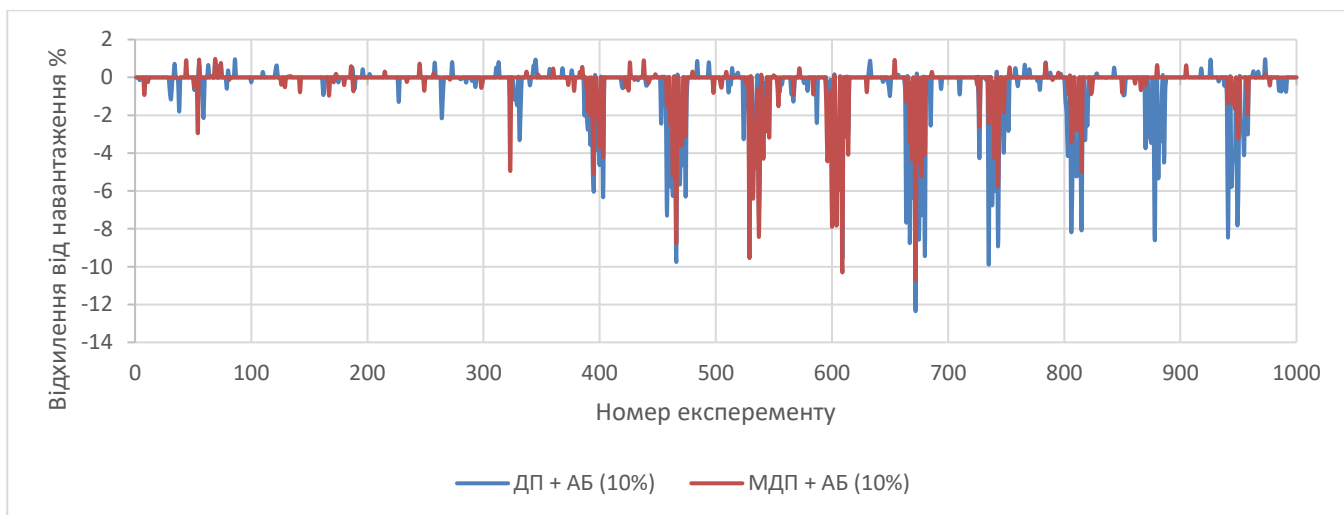


Рисунок – В.3 Динаміка відхилення від навантаження споживачів для МДП та КДП з використання АБ енергетичною ємністю 10% номінальної потужності ВЕС

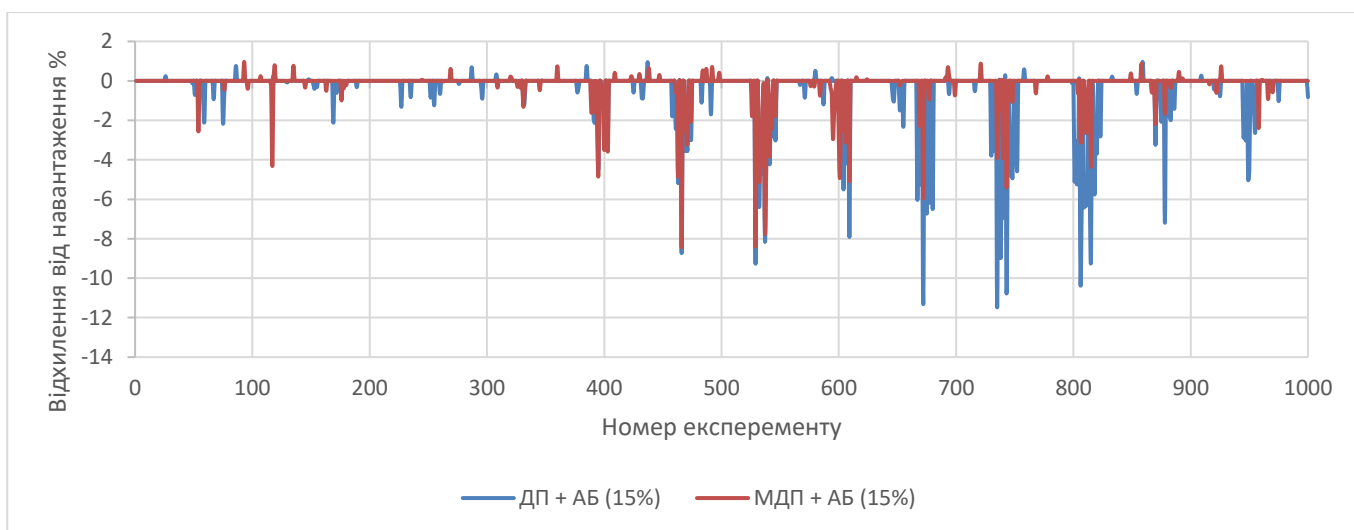


Рисунок – В.4 Динаміка відхилення від навантаження споживачів для МДП та КДП з використання АБ енергетичною ємністю 15% номінальної потужності ВЕС

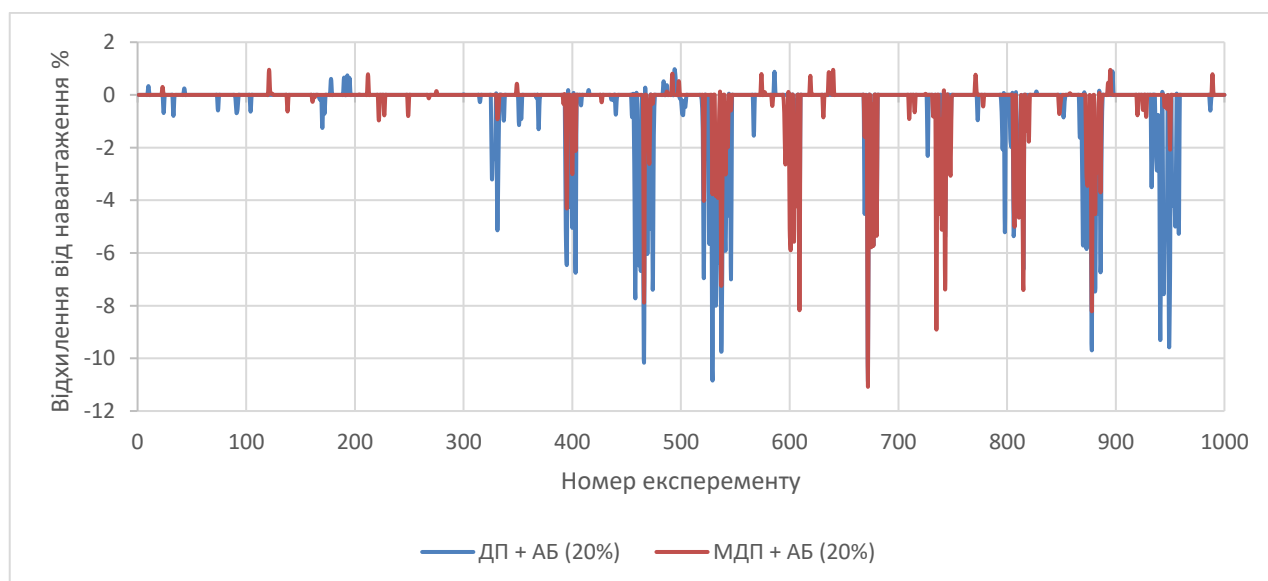




Рисунок – В.5 Динаміка відхилення від навантаження споживачів для МДП та КДП з використання АБ енергетичною ємністю 20% номінальної потужності ВЕС

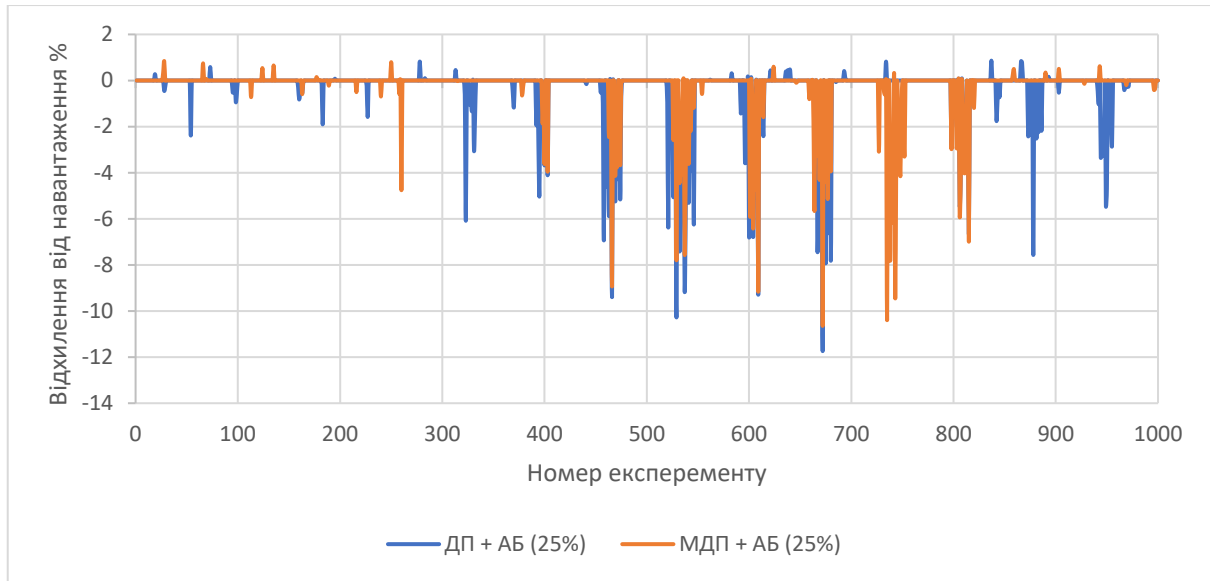


Рисунок – В.6 Динаміка відхилення від навантаження споживачів для МДП та КДП з використання АБ енергетичною ємністю 25% номінальної потужності ВЕС

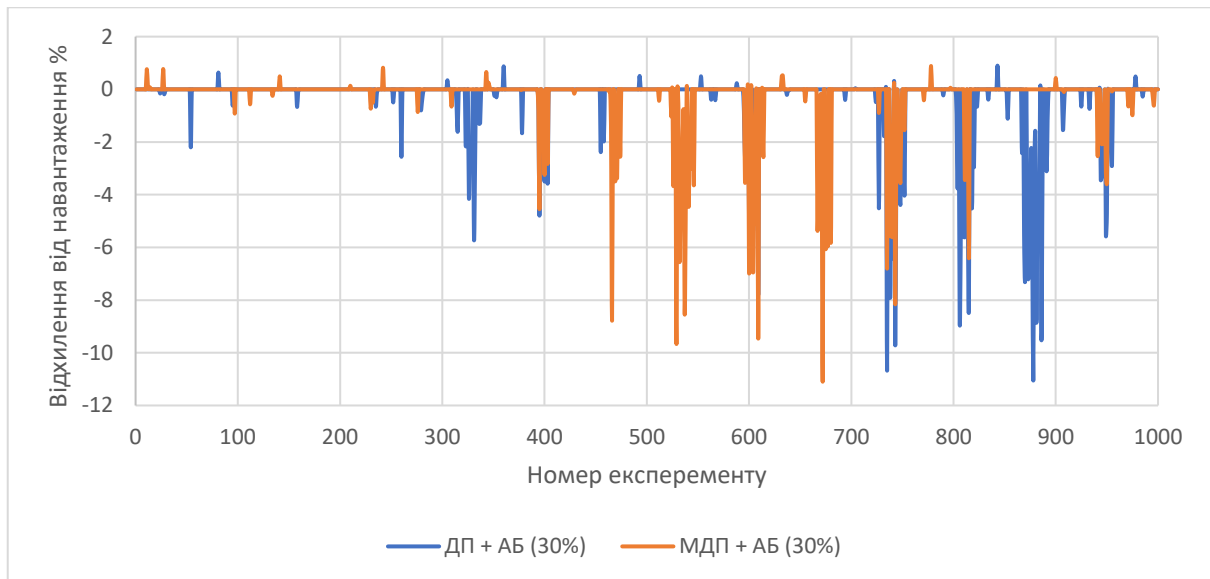


Рисунок – В.7 Динаміка відхилення від навантаження споживачів для МДП та КДП з використання АБ енергетичною ємністю 30% номінальної потужності ВЕС

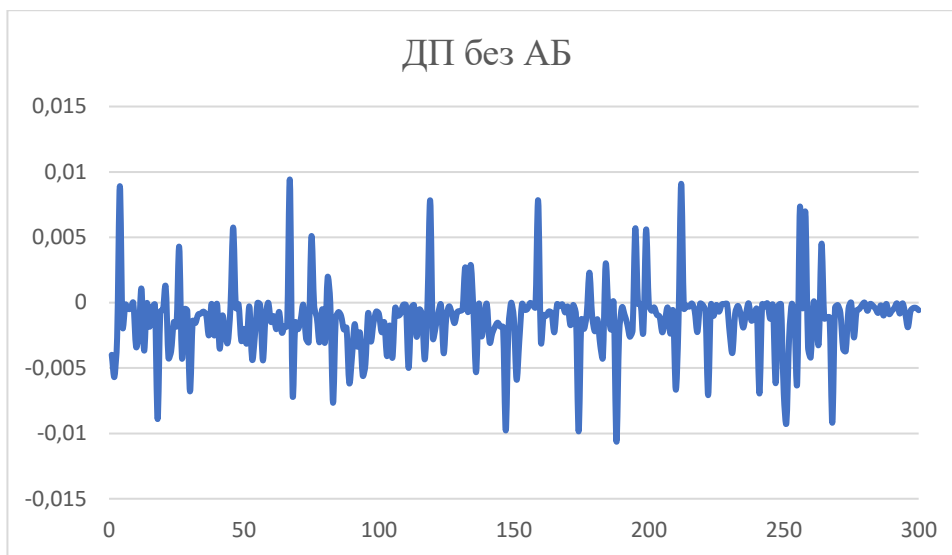


Рисунок – В.8 Динаміка відхилень потужності ВЕС від графіка навантаження споживачів, при використанні класичного методу динамічного програмування без застосування акумуляторної батареї

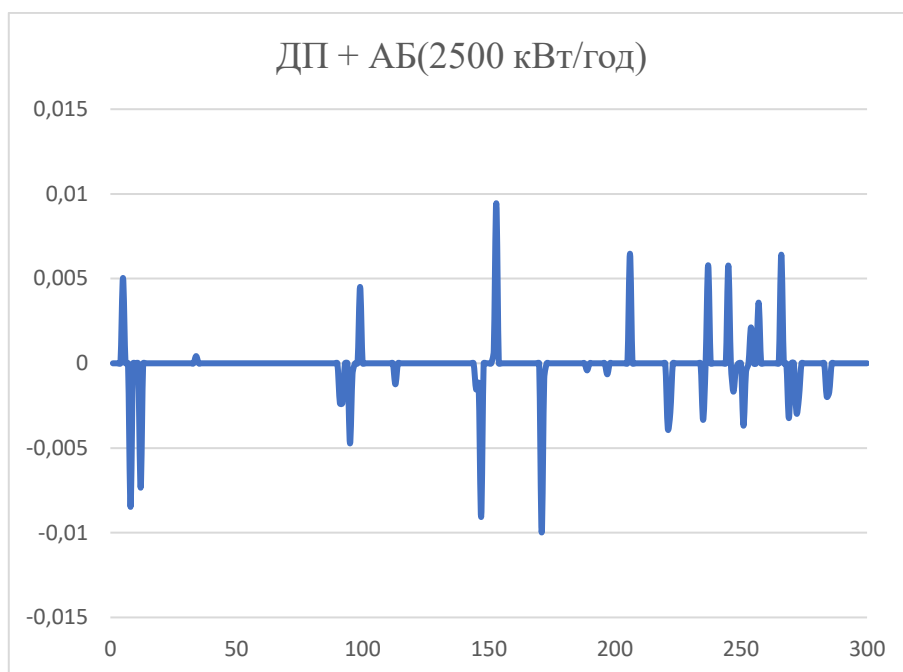


Рисунок – В.9 Динаміка відхилень потужності ВЕС від графіка навантаження споживачів, при використанні класичного методу динамічного програмування з застосуванням акумуляторної батареї ємністю 2500 кВт / год

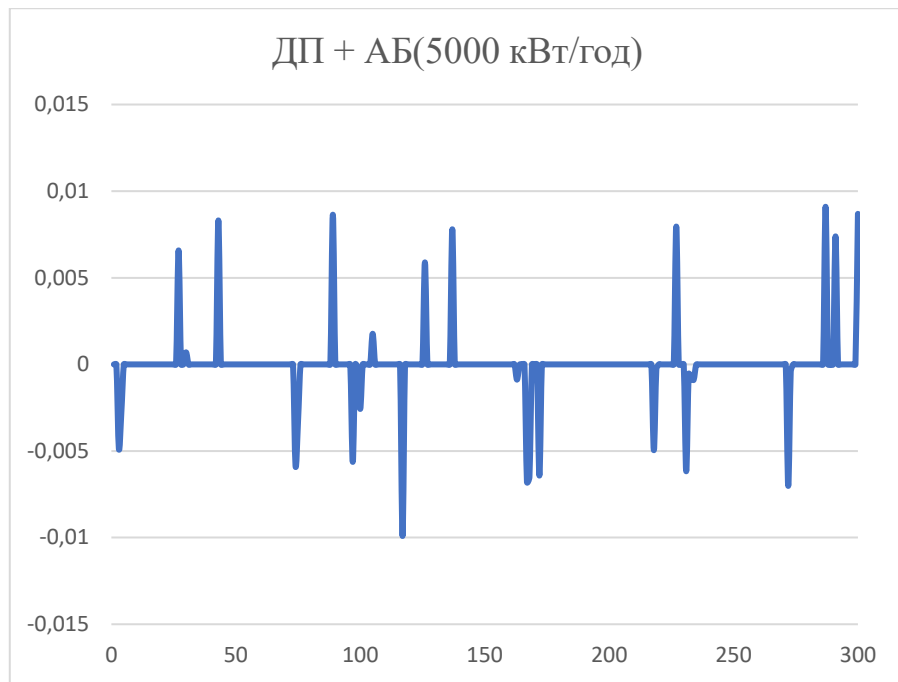


Рисунок – В.10 Динаміка відхилень потужності ВЕС від графіка навантаження споживачів, при використанні класичного методу динамічного програмування з застосуванням акумуляторної батареї ємністю 5000 кВт / год

Таблиця В.1 – Результати реалізації імітаційної моделі

Енергетична ємність акумулятора (% від встановленої потужності ВЕС)		0	5	10	15	20	25	30
Середнє відхилення	КДП, кВт	386	277	173	133	155	122	113
	МДП, кВт	203	137	96	62	81	84	85
	Різниця (%)	90	100	81	110	93	46	36
Кількість перевизначень на 1000 експериментів	КДП	887	625	394	273	244	203	184
	МДП	864	612	383	260	199	183	157
	Різниця, %	2,66	2,1	2,87	5,00	22,61	10,93	17,20
Ефективність набору	КДП	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
	МДП	0,57	0,56	0,56	0,57	0,57	0,57	0,57
	Різниця, %	3,04	2,94	2,83	3,57	3,03	2,99	2,81

## ДОДАТОК Г

### Фрагмент програмного коду розробленого ПЗ

#### DPModification.class

```

package ua.lpnu.wei.model.weicontrol.knapsack.dp;

import java.io.PrintStream;
import java.util.BitSet;
import org.apache.commons.logging.Log;
import org.apache.commons.logging.LogFactory;
import org.springframework.beans.factory.annotation.Autowired;
import org.springframework.stereotype.Component;
import ua.lpnu.wei.model.models.SetOfWEI;
import ua.lpnu.wei.model.weicontrol.knapsack.Knapsack;
import ua.lpnu.wei.model.weicontrol.knapsack.assessment.KnapsackAssessment;

@Component("dpm")
public class DPModification implements Knapsack
{
    static Log log = LogFactory.getLog(DPModification.class);

    @Autowired
    private KnapsackAssessment assessment;

    private SetOfWEI set;
    private double deneneratedProfit;
    private double weightOfKnapsack;
    private OptimalSetWEI[][] matrix;

    public DPModification()
    {
        weightOfKnapsack = 0.0D;
    }

    public void setSetOfWEI(SetOfWEI set) {
        this.set = set;
    }

    public String toString()
    {
        {
            StringBuilder sb = new StringBuilder();
            for (OptimalSetWEI[] rows : matrix) {
                for (OptimalSetWEI col : rows) {
                    sb.append(String.format("%.3f \t", new Object[] { col }));
                }
                sb.append("\n");
            }
            sb.append("\n");
            return sb.toString();
        }
    }

    public BitSet getOptimalSet()
    {
        int N = set.size();

        matrix = new OptimalSetWEI[2][((int)(weightOfKnapsack + 1.0D))];
        int inputRow = 1; int outputRow = 0;
        for (int i = 0; i < matrix[outputRow].length; i++) {
            matrix[outputRow][i] = new OptimalSetWEI();
        }

        for (int item = 1; item <= N; item++)
        {
            if (assessment.isAvailable(set.get(item - 1)))
            {
                for (int weight = 0; weight <= weightOfKnapsack; weight++) {
                    int currentIndexOne = (int)(weight - assessment.getWeight(set.get(item - 1)));
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        if (currentIndexOne < 0) {
            currentIndexOne = 0;
        }
        double generalProfitOne =
assessment.getGeneralProfit(matrix[outputRow][currentIndexOne],
            set.get(item - 1), weight);

        OptimalSetWEI a = matrix[outputRow][currentIndexOne];
        try {
            OptimalSetWEI localOptimalSetWEI1 = matrix[outputRow][(currentIndexOne + 1)];
        } catch (Exception e) {
            System.out.println(e);
        }
        if (!matrix[outputRow][currentIndexOne].equals(matrix[outputRow][(currentIndexOne
+ 1)])) {
            int currentIndexTwo = currentIndexOne + 1;
            double generalProfitTwo =
assessment.getGeneralProfit(matrix[outputRow][currentIndexTwo],
                set.get(item - 1), weight);
            if (generalProfitOne < generalProfitTwo) {
                currentIndexOne = currentIndexTwo;
                generalProfitOne = generalProfitTwo;
            }
        }
        double previousGeneralAssesmen =
assessment.getGeneralProfit(matrix[outputRow][weight], weight);
        if (generalProfitOne > previousGeneralAssesmen) {
            matrix[inputRow][weight] = new OptimalSetWEI();
            matrix[inputRow][weight].setProfit(
                matrix[outputRow][currentIndexOne].getProfit() +
assessment.getProfit(set.get(item - 1)));
            matrix[inputRow][weight].setWeight(
                matrix[outputRow][currentIndexOne].getWeight() +
assessment.getWeight(set.get(item - 1)));

            matrix[inputRow][weight].getOptimalSet().set(item - 1, true);

matrix[inputRow][weight].getOptimalSet().or(matrix[outputRow][currentIndexOne].getOptimalSe
t());
        } else {
            matrix[inputRow][weight] = matrix[outputRow][weight];
        }
    }
    int temp = inputRow;
    inputRow = outputRow;
    outputRow = temp;
} }
    denegeratedProfit =
        (matrix[outputRow][((int)weightOfKnapsack)].getProfit() /
matrix[outputRow][((int)weightOfKnapsack)].getOptimalSet().cardinality());
    BitSet result = matrix[outputRow][((int)weightOfKnapsack)].getOptimalSet();
    log.info("Optimal set --> " + result);
    return result;
}

public double getDeneratedProfit() {
    return denegeratedProfit;
}

public void setLoad(double load)
{
    weightOfKnapsack = load;
}

public String getKey()
{
    return "dpm";
}

public KnapsackAssessment getKnapsackAssessment()
{

```

```

    return assessment;
}
}

```

### **OptimalSetWEI.class**

```

package ua.lpnu.wei.model.weicontrol.knapsack.dp;

import java.util.BitSet;

public class OptimalSetWEI {
    private BitSet optimalSet = new BitSet();
    private double weight = 0.0D;
    private double assessment = 0.0D;

    public OptimalSetWEI() {}

    public String toString() { return "[" + weight + ", " + assessment + "]; }

    public int hashCode()
    {
        int prime = 31;
        int result = 1;

        long temp = Double.doubleToLongBits(weight);
        result = 31 * result + (int)(temp ^ temp >>> 32);
        temp = Double.doubleToLongBits(assessment);
        result = 31 * result + (int)(temp ^ temp >>> 32);
        return result;
    }

    public boolean equals(Object obj)
    {
        if (this == obj)
            return true;
        if (obj == null)
            return false;
        if (getClass() != obj.getClass())
            return false;
        OptimalSetWEI other = (OptimalSetWEI)obj;
        if (Double.doubleToLongBits(weight) != Double.doubleToLongBits(weight))
            return false;
        if (Double.doubleToLongBits(assessment) != Double.doubleToLongBits(assessment))
            return false;
        return true;
    }

    public BitSet getOptimalSet() {
        return optimalSet;
    }

    public void setOptimalSet(BitSet optimalSet) {
        this.optimalSet = optimalSet;
    }

    public double getProfit() {
        return assessment;
    }

    public void setProfit(double assessmentOfSet) {
        assessment = assessmentOfSet;
    }

    public double getWeight() {
        return weight;
    }

    public void setWeight(double weight) {
        this.weight = weight;
    }
}

```

**ExpertAssessments.class**

```

package ua.lpnu.wei.model.saaty;

import edu.emory.mathcs.backport.java.util.Arrays;
import java.util.ArrayList;
import java.util.List;
import org.apache.commons.lang.ArrayUtils;
import org.apache.commons.logging.Log;
import org.apache.commons.logging.LogFactory;
import org.springframework.beans.factory.annotation.Autowired;
import org.springframework.context.annotation.Bean;
import org.springframework.context.annotation.Configuration;
import org.springframework.context.annotation.Scope;
import org.springframework.stereotype.Component;

@Component
@Configuration
public class ExpertAssessments
{
    static Log log = LogFactory.getLog(ExpertAssessments.class);
    @Autowired
    private Matrix matrix;

    public ExpertAssessments() {}

    @Bean(name={"weightingCoefficients"})
    @Scope("prototype")
    public List<Double> foundVectorWeightCoeff() { double eigenvalue =
Matrixs.eigenvalueOfMatrix(new PolynomialMatrix(this.matrix));
    Matrix matrix = preperinMatrixForGaussian(eigenvalue);
    List<Double> ea = Matrixs.gaussianSolve(matrix);
    log.info("Expert assessments --> " + ea);
    return ea;
    }

    private Matrix preperinMatrixForGaussian(double eigenvalue) {
    List<List<Double>> matr = setValue(matrix, eigenvalue);
    return new Matrix(Integer.valueOf(matr.size()), matr);
    }

    private List<List<Double>> setValue(Matrix matrix, double eigenvalue) {
    List<List<Double>> result = new ArrayList();
    double[][] matr = new double[matrix.length()][matrix.length() + 1];
    for (int i = 0; i < matrix.length(); i++) {
        matr[i][matrix.length()] = 0.0D;
    }
    for (int i = 0; i < matrix.length() + 1; i++) {
        matr[(matrix.length() - 1)][i] = 1.0D;
    }
    for (int i = 0; i < matrix.length() - 1; i++) {
        for (int j = 0; j < matrix.length(); j++) {
            matr[i][j] = matrix.getMatrixValue(i, j);
            if (i == j) {
                matr[i][j] -= eigenvalue;
            }
        }
    }
    for (int i = 0; i < matr.length; i++) {
        Double[] doubleArray = ArrayUtils.toObject(matr[i]);
        result.add(Arrays.asList(doubleArray));
    }
    return result;
    }
}

```

**WEINormalization.class**

```

package ua.lpnu.wei.model.weicontrol.knapsack.assessment;

import java.util.Arrays;

```

```

import java.util.Iterator;
import java.util.List;
import org.apache.commons.logging.Log;
import org.apache.commons.logging.LogFactory;
import org.springframework.beans.factory.annotation.Value;
import org.springframework.stereotype.Component;
import ua.lpnu.wei.model.models.SetOfWEI;
import ua.lpnu.wei.model.models.wei.ConcreteWEI;

@Component
public class NormalizationOfWEI
{
    static Log log = LogFactory.getLog(NormalizationOfWEI.class);
    @Value("${range.max}")
    private double rangeMax;
    @Value("${range.min}")
    private double rangeMin;

    public NormalizationOfWEI() {}

    public void normalization(SetOfWEI set) { List<ConcreteWEI> list = set.getListOfWEI();
        double[] min = foundMin(list);
        log.debug("min --> " + Arrays.toString(min));
        double[] max = foundMax(list);
        log.debug("max --> " + Arrays.toString(max));
        for (ConcreteWEI element : list) {
            log.debug("element --> " + element.getListOfParam());
            normalizationWEI(element, min, max);
            log.debug("normaliz --> " + element.getListOfNormalizParam());
        }
    }

    private double[] foundMin(List<ConcreteWEI> list) {
        double[] resultArray = new double[((ConcreteWEI)list.get(0)).getSize()];
        Arrays.fill(resultArray, Double.MAX_VALUE);
        ConcreteWEI element; int i; for (Iterator localIterator = list.iterator();
localIterator.hasNext();
        i < element.getSize())
        {
            element = (ConcreteWEI)localIterator.next();
            i = 0; continue;
            if (element.getListOfParam(i) <= resultArray[i]) {
                resultArray[i] = element.getListOfParam(i);
            }
            i++;
        }

        return resultArray;
    }

    private double[] foundMax(List<ConcreteWEI> list) {
        double[] resultArray = new double[((ConcreteWEI)list.get(0)).getSize()];
        Arrays.fill(resultArray, -100000.0D);
        ConcreteWEI element; int i; for (Iterator localIterator = list.iterator();
localIterator.hasNext();
        i < element.getSize())
        {
            element = (ConcreteWEI)localIterator.next();
            i = 0; continue;
            if (element.getListOfParam(i) >= resultArray[i]) {
                resultArray[i] = element.getListOfParam(i);
            }
            i++;
        }

        return resultArray;
    }
}

```



## ДОДАТОК Д

## Акти впровадження результатів дисертаційних досліджень



## АКТ

впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи  
Кравчишина Віталія Степановича

**“Інтелектуалізація управління комплексною системою генерації електричної енергії”**

Комісія у складі директора ТОВ "ЕКО-ОПТИМА" Козицького Максима Зіновійовича, заступника директора з енергетичних питань Шпака Маркіяна Тарасовича, склали дійсний акт про те, що результати дисертаційної роботи **“Інтелектуалізація управління комплексною системою генерації електричної енергії”** представлені на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук можуть бути використані в проектно-конструкторській діяльності ТОВ "ЕКО-ОПТИМА". Для оцінки можливості впровадження на підприємстві передано:

- метод статистичного аналізу швидкості вітру з використанням сімейств двопараметричних неперервних розподілів, який забезпечує можливість визначення ймовірнісного діапазону робочих швидкостей вітру, оцінювання співвідношення потужності ВЕС та енергоакуюлюючого елемента
- модель управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції на основі бази продукційних правил з врахуванням ємності енергоакуюлюючого елемента, яка забезпечує можливість інтелектуалізації процесів управління енергодинамічними режимами
- метод визначення активного складу вітрової електростанції, який ґрунтується на удосконаленому методі динамічного програмування, експертних оцінках параметрів, використовує узагальнений критерій ефективності вітрової електроустановки, доступну енергетичну ємність акумуляуючого елемента та забезпечує можливість приймати рішення в режимі реального часу

Кравчишин В.С. підтверджує, що передача вказаних вище матеріалів не породжує для ТОВ "ЕКО-ОПТИМА" жодних фінансових чи будь-яких інших зобов'язань ні щодо нього особисто, ні щодо третіх осіб.

Практичне застосування розроблених Кравчишином В.С. моделей та методів забезпечує визначення активного складу вітрової електростанції в режимі реального часу з врахуванням навантаження споживачів, енергетичного потенціалу вітру, потужностей ВЕС та енергетичної ємності енергоакуюлюючого елемента.

Передбачається можливість використання результатів дисертаційної роботи в розроблені нових підходів до управління енергодинамічними процесами за наявності акумуляуючого елемента.

Директор ТОВ «ЕКО-ОПТИМА»

Козицький М.З.

Заступник директора  
з енергетичних питань ТОВ "ЕКО-ОПТИМА"

Шпак М.Т.

Дисертант

Кравчишин В.С.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з наукової роботи  
Національного університету  
“Львівська політехніка”

проф. Чухрай Н.І.

2018 р.



АКТ

про використання результатів дисертації

**“Інтелектуалізація управління комплексною системою генерації електричної енергії”**

асистента кафедри автоматизованих систем управління

**Кравчишина Віталія Степановича**

представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології

при виконанні науково-дослідних робіт, які виконувались в Інституті комп’ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету “Львівська політехніка”.

Ми, що нижче підписалися, начальник НДЧ к.т.н., доц. Жук Л.В. та члени комісії: завідувач відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень к.т.н. Лазько Г.В.; завідувач планово-фінансового відділу Чулой Т.М. та завідувач кафедри автоматизованих систем управління Цмоць Іван Григорович цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи асистента кафедри автоматизованих систем управління Кравчишина Віталія Степановича використано під час виконання науково-дослідної роботи: “Інтелектуальні інформаційні технології багаторівневого управління енергоефективністю регіону” (№ державної реєстрації 0117U004450).

В рамках науково-дослідної роботи Кравчишин В.С. розробив метод визначення активного складу вітрової електростанції, який ґрунтується на експертних оцінках параметрів, удосконаленому методі динамічного програмування та використовує енергетичну ємність акумулюючого елемента, на основі цього розробив програмні засоби інтелектуалізації автоматизованої системи управління енергодинамічними процесами вітрових електростанцій, які забезпечують підвищення ефективності використання енергетичного обладнання та гарантованого енергозабезпечення споживачів

Голова комісії:

Начальник науково-дослідної частини,  
к.т.н., доцент

Л.В. Жук

Члени комісії:

зав. відділу науково-організаційного  
супроводу наукових досліджень, к.т.н.

Г.В. Лазько

заст. начальника планово-фінансового  
відділу

Т.М. Чулой

зав. каф. автоматизованих систем управління  
д.т.н., професор

І.Г. Цмоць



“ЗАТВЕРДЖУЮ”



Проректор з наукової роботи  
Національного університету  
"Львівська політехніка"

проф. Чухрай Н.І.

2018 р.

АКТ

про використання результатів дисертації

**“Інтелектуалізація управління комплексною системою генерації електричної енергії”**

асистента кафедри автоматизованих систем управління

**Кравчишина Віталія Степановича**

представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології

при виконанні науково-дослідних робіт Національного університету “Львівська політехніка”.

Ми, що нижче підписалися, начальник НДЧ к.т.н., доц. Жук Л.В. та члени комісії: завідувач відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень к.т.н. Лазько Г.В.; завідувач планово-фінансового відділу Чулой Т.М. та завідувач кафедри автоматизованих систем управління Цмоць Іван Григорович цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи асистента кафедри автоматизованих систем управління Кравчишина Віталія Степановича використано під час виконання науково-дослідної роботи кафедри автоматизованих систем управління Національного університету «Львівська політехніка»: “Розроблення компонентів для синтезу інтегрованих автоматизованих систем управління” (№ державної реєстрації 0114U001232).

В рамках науково-дослідної роботи Кравчишин В.С. розробив метод статистичного аналізу швидкості вітру з використанням сімейств двопараметричних неперервних розподілів, що забезпечує можливість визначення ймовірнісного діапазону робочих швидкостей вітру, оцінювання співвідношення потужності ВЕС та енергоакумуляуючого елемента, розробив модель управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції на основі бази продукційних правил з врахуванням ємності енергоакумуляуючого елемента, яка сприяє забезпеченню інтелектуалізації процесів управління енергодинамічними режимами, розробив модифікацію методу динамічного програмування для визначення активного складу вітрової електричної станції, шляхом введення адитивної функції мети, яка враховується на кожному кроці алгоритму та забезпечує необхідний коефіцієнт ефективності набору.

Голова комісії:

Начальник науково-дослідної частини,  
к.т.н., доцент

Л.В. Жук

Члени комісії:

зав. відділу науково-організаційного  
супроводу наукових досліджень, к.т.н.

Г.В. Лазько

заст. начальника планово-фінансового відділу

Т.М. Чулой

зав. каф. автоматизованих систем управління  
д.т.н., професор

І.Г. Цмоць



“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з науково-педагогічної роботи

Національного університету

"Львівська політехніка"

О.Р. Давидчак

" \_\_\_\_\_ " 2019 р.

### АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів  
кандидатської дисертаційної роботи  
**Кравчишина Віталія Степановича**

Цей акт складено про те, що результати кандидатської роботи Кравчишина Віталія Степановича на тему “Інтелектуалізація управління комплексною системою генерації електричної енергії” представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, використовуються у навчальному процесі кафедри “Автоматизовані системи управління” Національного університету “Львівська політехніка”. Матеріали дисертаційного дослідження використовуються під час написання студентами курсових робіт, кваліфікаційних бакалаврських та магістерських робіт, а також під час викладання дисциплін: “Моделювання систем”, “Теорія прийняття рішень”, “Математичні методи дослідження операцій”.

Зокрема в навчальному процесі використовуються запропоновані В.С. Кравчишином:

– метод статистичного аналізу швидкості вітру з використанням сімейств двопараметричних неперервних розподілів, який забезпечує можливість визначення ймовірнісного діапазону робочих швидкостей вітру, оцінювання співвідношення потужності вітрової електричної станції та енергоакумуляуючого елемента (дисципліна “Моделювання систем”, тема 7 “Аналіз даних” для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр”, що навчаються за спеціальністю 122 “Комп’ютерні науки”);

– модель управління енергодинамічними режимами вітрової електричної станції на основі бази продукційних правил з врахуванням ємності енергоакумуляуючого елемента, сприяє забезпеченню інтелектуалізації процесів управління енергодинамічними режимами (дисципліна “Теорія прийняття рішень”, тема 2 “Багатокритеріальні задачі прийняття рішень” для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр”, що навчаються за спеціальністю 122 “Комп’ютерні науки”);

– удосконалений метод динамічного програмування для визначення активного складу вітрової електричної станції, який забезпечує необхідний коефіцієнт ефективності набору і мінімізує відхилення результату від заданого

навантаження (дисципліна “Математичні методи дослідження операцій”, тема 6 “Динамічне програмування” для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр”, що навчаються за спеціальністю 122 “Комп’ютерні науки”).

Ефект від використання результатів кандидатської дисертаційної роботи Кравчишина В.С. полягає у вивченні майбутніми фахівцями сучасних методів та засобів інтелектуалізації системи управління енергетичними процесами вітрової електричної станції для підвищення ефективності використання енергетичного обладнання та гарантованого енергозабезпечення споживачів.

Завідувач кафедри АСУ  
д.т.н., професор



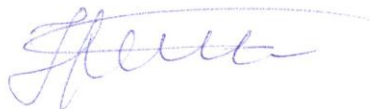
І.Г. Цмоць

Доцент кафедри АСУ  
к.т.н., доцент



А.Є. Батюк

Доцент кафедри АСУ  
к.ф.-м.н., доцент



І.М. Дронюк