

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СОЛДАТЕНКО ВАЛЕНТИН ПЕТРОВИЧ

УДК 621.316.13

ДИСЕРТАЦІЯ

**АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ГЕНЕРАЦІЄЮ АКТИВНОЇ
ПОТУЖНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ
В КОМБІНОВАНІЙ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ**

05.13.07 – Автоматизація процесів керування
Технічні науки

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

_____ / В.П. Солдатенко/

Науковий керівник – Плешков Петро Григорович
кандидат технічних наук, професор

Кропивницький – 2019 рік

АНОТАЦІЯ

Солдатенко В.П. Автоматичне керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.07 «Автоматизація процесів керування». – Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, 2019.

Робота присвячена вирішенню актуальної наукової задачі забезпечення максимально можливого рівня генерації активної потужності установками з відновлюваними джерелами енергії за умов дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів до розподільної електричної мережі.

При застосуванні установок з відновлюваними джерелами енергії на промислових підприємствах, точка їх підключення до розподільної електричної мережі, як правило, співпадає з точкою приєднання електроспоживачів. Це веде до того, що в режимі генерації електричної потужності відбувається підвищення напруги в точці приєднання установки генерації до мережі. Тому в режимі реверсивного потоку потужності в розподільній електричній мережі можуть спостерігатися понаднормові завищені значення усталеного відхилення напруги.

В першому розділі проведено аналіз сучасного стану питання використання установок з відновлюваними джерелами енергії, а також засобів автоматизації їх роботи. Встановлено, що для кліматичних умов України найдоцільнішим є використання сонячної, вітрової енергії а також енергії біомаси. При цьому сумісне використання установок, що перетворюють зазначені відновлюваних джерела, в складі комбінованої

електроенергетичної системи, яка працює паралельно з електричною мережею, дозволяє знизити негативний вплив від нерівномірності потоків первинних енергетичних ресурсів.

Проведений аналіз особливостей застосування установок з відновлюваними джерелами енергії, що входять до складу комбінованої електроенергетичної системи. Встановлено, що в режимі генерації електричної потужності вони спричиняють негативний вплив на показники якості електроенергії в розподільній електричній мережі, зокрема призводять до понаднормового підвищення рівня усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів. В результаті проведеного аналізу існуючих методів та технічних засобів приєднання установок з відновлюваними джерелами енергії до електричної мережі, встановлено, що одним із найпоширеніших підходів до вирішення проблеми понаднормового підвищення рівня усталеного відхилення напруги в режимі генерації комбінованої електроенергетичної системи є обмеження рівня генерації електричної потужності в мережу з допомогою напівпровідникових пристроїв. Аналіз існуючих систем автоматичного керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі показав, що в більшості з них обмеження генерації електричної потужності в мережу відбувається за рахунок встановлення фіксованого значення максимально допустимого рівня відхилення напруги. Суттєвим недоліком такого підходу є те, що він призводить до неповного використання наявної потужності генерації відновлюваних джерел енергії, і, як наслідок, до зменшення доходу від генерації електричної енергії за «зеленим» тарифом.

В другому розділі представлена загальна методика розв'язання задачі автоматичного керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі. Зазначена задача полягає в тому, що з метою одночасного забезпечення зниження рівня

усталеного відхилення напруги на шинах споживачів та максимально ефективного використання наявної потужності відновлюваних джерел енергії необхідно мінімізувати два критерії шляхом автоматичного керування рівнем генерації активної потужності кожної з установок з відновлюваними джерелами енергії. Показано, що задачу керування установками генерації електричної потужності з відновлюваними джерелами енергії, найдоцільніше інтерпретувати як задачу багатокритеріальної оптимізації. Критеріями оптимізації є дохід від генерації потужності в електромережу установками з відновлюваними джерелами енергії за ставкою «зеленого» тарифу та збитки від понаднормових значень усталеного відхилення напруги на затискачах електроспоживачів.

Поставлена задача автоматичного керування рівнем генерації активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі розв'язувалась методом наближення до утопічної точки в просторі запропонованих критеріїв. При цьому кінцевий розв'язок такої задачі знаходився в результаті розв'язання задачі мінімізації чебишевської відстані від утопічної точки до парето-оптимальної множини рішень.

В третьому розділі запропоновані математичні моделі елементів комбінованої електроенергетичної системи, структурна схема системи автоматичного керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі та алгоритм визначення оптимального вектора керування, в основу яких покладено розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації. Створено комп'ютерну імітаційну модель системи автоматичного керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі.

Проведена оцінка стійкості розробленої системи автоматичного керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в

комбінованій електроенергетичній системі шляхом аналізу перехідних процесів на комп'ютерній імітаційній моделі, зважаючи на значну нелінійність розробленої системи автоматичного керування. Аналіз графіків, отриманих в результаті подачі на вхід розробленої системи автоматичного керування ступінчатого збурення показав, що перехідний процес має аперіодичний характер. Це свідчить, що розроблена в роботі система автоматичного керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі задовольняє вимогам стійкості.

Підтверджена перевага запропонованої системи автоматичного керування над базовою, про що свідчать результати комп'ютерного моделювання розробленої системи автоматичного керування, в основу роботи якої покладено знайдені розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації. Для випадку розробленої системи автоматичного керування величина генерації активної потужності виявилась на 8,13 % більшою в порівнянні з базовою системою автоматичного керування. При цьому значення усталеного відхилення напруги для випадку розробленої системи автоматичного керування задовольняють вимогам ГОСТ 13109-97.

У четвертому розділі роботи наведено результати перевірки працездатності розробленої системи автоматичного керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі шляхом експериментальних досліджень. Запропоновано макет блоку автоматичного керування та лабораторний стенд для проведення експериментальних досліджень. Показано, що похибка між результатами експериментальних досліджень та результатами комп'ютерного імітаційного моделювання лежить в межах 3...4%, що свідчить про адекватність та працездатність розробленої в роботі системи автоматичного керування генерацією активної потужності установок з відновлюваними джерелами енергії в комбінованій електроенергетичній системі.

Проведений техніко-економічний аналіз показав ефективність запропонованої у роботі системи автоматичного керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі у порівнянні з базовою.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що у дисертації визначено, поставлено та розв'язано задачу забезпечення максимально можливого рівня генерації активної потужності установками з відновлюваними джерелами енергії за умов дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів до розподільної електричної мережі. В процесі розв'язання цієї задачі отримано ряд нових наукових результатів:

1. Вперше поставлена та розв'язана задача автоматичної зміни уставки обмеження потужності генерації установками з відновлюваними джерелами енергії, що працюють в комбінованій електроенергетичній системі.

2. Отримав подальший розвиток метод розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації шляхом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв для формалізації задачі автоматичного керування генерацією активної потужності установками з відновлюваними джерелами.

3. Удосконалено імітаційні моделі системи автоматичного керування установками генерації електричної потужності, що містять відновлювані джерела енергії, які, на відміну від існуючих, дозволяють проводити аналіз режимів роботи розподільних електричних мереж за умов забезпечення максимального рівня генерації активної потужності установками з відновлюваними джерелами енергії при дотриманні нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів до розподільної електричної мережі.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

1. Створено комп'ютерну імітаційну модель системи автоматичного керування установками генерації електричної потужності, що містять відновлювані джерела енергії.

2. Запропоновано методику розрахунку вектора керування установками генерації електричної потужності, що містять відновлювані джерела енергії.

3. Окремі результати дисертаційної роботи використовуються ТОВ «ЕЛЕКТРОАКТИВ-МОНТАЖ», а саме комп'ютерна імітаційна модель системи автоматичного керування установками, що виробляють електричну енергію з відновлюваних джерел енергії.

4. Розроблена комп'ютерна імітаційна модель системи автоматичного керування установками генерації електричної потужності, що містять відновлювані джерела енергії, використовується в навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету, а саме при викладанні дисциплін «Автоматизація контролю та управління якістю електричної енергії» та «Джерела енергії».

Ключові слова: розподільна електрична мережа, відновлювані джерела енергії, сонячна електростанція, вітрова електростанція, біогазова електростанція, система автоматичного керування, показники якості електричної енергії.

ABSTRACT

Soldatenko V.P. Automatic control of generator active power of renewable energy sources in the combined power system. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.13.07 "Automation of control processes". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2019.

The work is devoted to solving the urgent scientific problem of providing the highest possible level of generation of active power by plants with renewable energy sources, subject to the observance of the normally acceptable values of the steady voltage deviation at the point of connection of consumers to the electrical distribution network.

When using renewable energy plants in industrial plants, the point of connection to the distribution grid is usually the same as the point of connection of electricity consumers. This leads to the fact that in the mode of generation of electrical power there is an increase in voltage at the point of connection of the generation installation to the network. Therefore, overvoltage steady-state deviation values may be observed in the reverse power flow mode in the distribution electrical network.

The first section analyzes the current state of the issue of using renewable energy plants, as well as the means of automating their operation. It is found that the most appropriate for the climatic conditions of Ukraine is the use of solar, wind and biomass. The combined use of installations converting these renewable sources in the combined electricity system, which works in parallel with the electricity network, can reduce the negative impact from the irregularity of the flows of primary energy resources.

The peculiarities of the use of renewable energy plants included in the combined electricity system were analyzed. It is established that in the mode of generation of electric power they cause a negative impact on the quality indicators of electricity in the distribution electricity network, in particular, lead to an overtime increase in the level of steady voltage deviation at the point of connection of consumers. As a result of the analysis of the existing methods and technical means of connection of installations with renewable energy sources to the electricity grid, it is established that one of the most common approaches to solving the problem of over-voltage increase of the steady voltage deviation in the mode of generation of the combined electric power system is to limit the level of

generation of electric power from the grid. using semiconductor devices. An analysis of the existing systems for automatic control of the generation of active power from renewable energy sources in the combined power system showed that in most of them the limitation of the generation of electric power to the network is due to the establishment of a fixed value of the maximum permissible level of voltage deviation. A significant disadvantage of this approach is that it leads to incomplete use of the available generation capacity of renewable energy sources and, as a consequence, to a reduction in electricity generation at a «green» tariff.

The second section presents a general method for solving the problem of automatic control of the generation of active power from renewable energy sources in a combined power system. The stated objective is to minimize two criteria by automatically controlling the level of active power generation of each of the renewable energy plants in order to simultaneously reduce the level of sustained voltage deviation on the consumer tires and maximize the efficient use of the available power of the renewable energy sources. It is shown that the problem of managing the power generation plants with renewable energy sources is most expediently interpreted as a multicriteria optimization problem. The optimization criteria are the revenue from the generation of power into the grid by plants with renewable energy at the rate of the «green» tariff and losses from the excess values of the steady voltage deviation at the clamps of the consumers.

The task of automatic control of the level of generation of active power of renewable energy sources in the combined power system was solved by the method of approaching a utopian point in the space of the proposed criteria. The ultimate solution to this problem was the result of solving the problem of minimizing the Chebyshev distance from the utopian point to the Pareto-optimal set of solutions.

In the third section mathematical models of elements of the combined power system are offered, a block diagram of the system of automatic control of generation of active power of renewable energy sources in the combined power

system and algorithm of determination of the optimal control vector, which are based on the solutions of the multicriteria optimization problem. A computer simulation model for an automatic control system for the generation of active power from renewable energy sources in a combined power system has been created.

The stability of the developed system of automatic control of generation of active power of renewable energy sources in the combined power system is carried out by the analysis of transients on the computer simulation model, considering the considerable nonlinearity of the developed system of automatic control. Analysis of the graphs obtained as a result of the filing of the developed system of automatic control of stepped perturbation showed that the transition process is aperiodic in nature. This indicates that the system of automatic control of generation of active power of renewable energy sources in the combined power system developed in the work satisfies the requirements of stability.

The advantage of the proposed automatic control system over the basic one is confirmed, as evidenced by the results of computer simulation of the developed automatic control system, which is based on the found solutions of the multicriteria optimization problem. For the case of the developed automatic control system, the value of the active power generation was 8.13% higher than the basic automatic control system. In this case, the value of the steady voltage deviation for the case of the developed automatic control system satisfy the requirements of GOST 13109-97.

The fourth section of the paper presents the results of testing the efficiency of the developed system of automatic control of the generation of active power of renewable energy sources in the combined power system by means of experimental studies. An automatic control unit layout and a laboratory bench for experimental testing are proposed. It is shown that the error between the results of experimental studies and the results of computer simulation is in the range of 3 ... 4%, which indicates the adequacy and efficiency of the system of automatic control of

generation of active power of plants with renewable energy sources in the combined power system.

The performed feasibility study showed the effectiveness of the system of automatic control of generation of active power of renewable energy sources in the combined power system compared to the baseline.

The scientific novelty of the obtained results is that the dissertation defines, sets and solves the problem of providing the maximum possible level of generation of active power by plants with renewable energy sources, subject to the observance of the normally acceptable values of the steady voltage deviation at the point of connection of electricity consumers to the power grid. In the process of solving this problem, we have obtained a number of new scientific results:

1. The task of automatically changing the power limitation setpoint for renewable energy plants operating in a combined power system is the first to be solved and solved.

2. A method for solving the multicriteria optimization problem by approaching a utopian point in the criterion space has been further developed to formalize the task of automatically managing the generation of active power by renewable energy plants.

3. Improved simulation models of the automatic control system for power generation plants containing renewable energy sources, which, unlike the existing ones, allow to analyze the modes of operation of the distribution power grids while providing the maximum level of generation of active power by the plants with renewable energy sources in compliance with normal permissible values of steady voltage deviation at the point of connection of consumers to the electrical distribution network.

The practical value of the work is as follows:

1. A computer simulation system for the automatic control of power generation installations containing renewable energy has been created;

2. The method of calculation of the vector of control of electric power generating installations containing renewable energy sources is proposed.

3. Some results of the dissertation work are used by «ELECTROACTIVE-INSTALLATION» LTD, namely, a computer simulation system for the automatic control of plants that generate electricity from renewable energy sources.

3. A computer simulation model for the system of automatic control of power generation units containing renewable energy sources is developed, which is used in the educational process of the Central Ukrainian National Technical University, namely in teaching the subjects «Automation of control and management of electricity quality» and «Energy Sources».

Keywords: power grid, renewable energy sources, solar power plant, wind power plant, biogas power plant, automatic control system, electricity quality indicators.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. **Солдатенко В.П.** Автоматичне керування режимами роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / **В.П. Солдатенко**, С.П. Плешков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №34 (1256). – С. 66-70 (Журнал індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РИНЦ, WorldCat і Google Scholar та включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory).

2. **Солдатенко В.П.** Система автоматичного керування роботою комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки. Вип. 187

Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2017. – С.37-39.

3. Плешков П.Г. Оптимальне керування режимом роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / П.Г. Плешков, Н.Ю. Гарасьова, **В.П. Солдатенко** // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. Збірник наукових праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – №32 (1308). – С. 64-70 (Журнал індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РИНЦ, WorldCat і Google Scholar та включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory).

4. Электроснабжение сельскохозяйственных потребителей на базе комплексной электроэнергетической системы с использованием возобновляемых источников энергии / П.Г. Плешков, С.П. Плешков, А.И. Котыш, **В.П. Солдатенко** // Електротехніка і електромеханіка, 2007. – №4. – С. 50 – 52.

5. 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 // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Вип. 87. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2009. – С. 24-26.

6. Вибір системи електропостачання з відновлювальними джерелами / Т.Г. Сабірзянов, П.Г. Плешков, М.В. Кубкін, **В.П. Солдатенко** // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки. Вип. 117. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2011 – С. 17–19.

7. Математична модель фотобатареї як джерела електричної енергії / Т.Г. Сабірзянов, М.В. Кубкін, **В.П. Солдатенко**, О.А. Козловський // Збірник

наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград: КНТУ, 2012. – Вип. 25, ч. 1. – С. 331-335.

8. **Солдатенко В.** Имитационная модель гибридной электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии / **В. Солдатенко**, М. Кубкин, Л. Вихрова // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. An International Journal on Operation of Farm and Agri-Food Industry Machinery – Lublin, 2014 – Vol. 16, №4 – P. 233-240. (Журнал індексується в наукометричній базі даних Index Copernicus).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

9. Плешков П.Г. Підвищення енергоефективності сільськогосподарського виробництва центрального регіону України на основі комплексної електроенергетичної системи / П.Г. Плешков, **В.П. Солдатенко** // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: Матеріали П'ятої міжнародної науково-практичної конференції. Львів. 2-3 квітня. Зб. наук. статей. – Львів: ЛьВЦНТЕІ, – 2009. – С.51-55.

10 Сабірзянов Т. Г. Рекомендації по застосуванню даних про сонячну радіацію для сонячних установок в умовах Кіровоградського регіону / Т.Г. Сабірзянов, М.В. Кубкін, **В.П. Солдатенко** // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» 21-22 грудня 2010 року – Тернопіль: ТНТУ, 2010 – С. 119.

11. **Солдатенко В.П.** Автоматичне керування режимами роботи розподільної електричної мережі при наявності джерел розосередженої генерації / **В.П. Солдатенко** // Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті:

Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції, 16-17 листопада 2017 р., Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – С. 88-90.

12. Плешков П.Г. Керування режимами роботи розподільної електричної мережі при наявності джерел розосередженої генерації / Плешков П.Г., **Солдатенко В.П.** // Прикладні науково-технічні дослідження (Applend scientific and technical research): Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції, 3-5 квітня 2018 р., Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2018.–С.71.

13. Плешков П.Г. Моделювання роботи системи оптимального керування режимом електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / Плешков П.Г., **Солдатенко В.П.** // Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві (АКІТ-2018): Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 15-16 листопада 2018 р., Кропивницький: ЦНТУ, 2018. – С. 103-104.

14. Плешков П.Г. Знаходження розв'язків задачі автоматичного керування режимом комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / Плешков П.Г., **Солдатенко В.П.**, Майборода С.О. // Перспективні напрямки інформаційних і комп'ютерних систем та мереж, комп'ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті: Матеріали Всеукр. науково-практичної інтернет конференції, 13-14 листопада 2018 р., Кропивницький: ЦНТУ, 2018. – С. 64.

*Опубліковані праці, які додатково відображають
наукові результати дисертації:*

15. Сабірзянов Т.Г. Методика вибору структури і складу систем електропостачання з відновлювальними джерелами / Т.Г. Сабірзянов, М.В. Кубкін, **В.П Солдатенко** // Збірник наукових праць Кіровоградського

національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград: КНТУ, 2011. Вип. 24, ч. 2. – С. 146-151.

16. Дослідження енергетичного потенціалу регіональних альтернативних джерел для оптимізації паливно-енергетичних балансів / П.Г. Плєшков, М.В. Кубкін, К.Г. Петрова, та ін. // Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка. Технічні науки. Вип. 141 Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2013 – С. 54-57.

17. Пат. 71470 МПК H02J 3/00. Спосіб живлення споживачів електричної енергії від централізованої енергосистеми і відновлюваних джерел енергії / Кубкін М. В, **Солдатенко В. П.**, Сіріков О.І. Номер заявки u 201200725; заявл. 24.01.2012; опубл. 10.07.2012, Бюл. №13.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ЗМІСТ.....	17
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГЕНЕРАЦІЄЮ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В КОМБІНОВАНИЙ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ	29
1.1 Сучасний стан розвитку відновлюваної енергетики в Україні	30
1.2 Аналітичний огляд методів та технічних засобів підключення установок генерації електроенергії з ВДЕ до електричної мережі.....	37
1.2.1. Аналіз існуючих методів та технічних засобів підключення СЕС до електричної мережі	38
1.2.2. Аналіз методів та технічних засобів підключення ВЕС до електричної мережі	43
1.2.3. Аналітичний огляд існуючих методів та технічних засобів підключення БГЕ до електричної мережі.....	48
1.3 Огляд методів та технічних засобів автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС	53
1.3.1. Огляд існуючих методів та технічних засобів автоматизації керування генерацією активної потужності СЕС	55
1.3.2. Огляд існуючих методів та технічних засобів автоматизації керування генерацією активної потужності ВЕС	63
1.3.3. Огляд існуючих методів та технічних засобів автоматизації керування генерацією активної потужності БГЕ.....	66
1.3.4. Аналітичний огляд існуючих методів та технічних засобів централізованого автоматичного керування режимом роботи КЕЕС	68

1.4. Постановка та етапи розв'язання задачі автоматизації керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС	72
1.5. Загальна методика досліджень	74
Висновки до розділу	76
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГЕНЕРАЦІЄЮ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В КОМБІНОВАНИЙ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ	
2.1 Постановка задачі автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС	79
2.2 Вибір методу розв'язання задачі автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС	85
2.3 Знаходження розв'язку задачі автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС	90
Висновки до розділу	93
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГЕНЕРАЦІЄЮ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В КОМБІНОВАНИЙ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ	
3.1 Математична модель об'єкту керування	96
3.1.1. Математична модель фотоелектричної батареї	98
3.1.2. Математична модель вітрогенератора	102
3.1.3. Математична модель двигуна внутрішнього згоряння	105
3.1.4. Математична модель напівпровідникового перетворювача	109
3.2 Структурна схема САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС та алгоритм визначення вектора керування	112
3.3 Комп'ютерна імітаційна модель САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС	117

3.4 Дослідження стійкості САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС	124
3.5 Комп'ютерне моделювання роботи САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС	127
3.5.1. Технологія комп'ютерного моделювання, опис базової моделі.....	127
3.5.2. Результати комп'ютерного моделювання роботи САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС	128
Висновки до розділу	139
РОЗДІЛ 4 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГЕНЕРАЦІЄЮ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В КОМБІНОВАНІЙ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ.....	140
4.1 Структурна схема мікропроцесорної САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС	141
4.2 Технічна реалізація мікропроцесорного БАК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС	143
4.3 Експериментальні дослідження САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС	146
Висновки до розділу	151
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	152
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	154
ДОДАТКИ	
Додаток А. Техніко-економічна оцінка ефективності використання САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС	167
Додаток Б. Принципова електрична схема блоку автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС	172
Додаток В. Принципова електрична схема блоку перетворення сигналів.....	173

	20
Додаток Г. Принципова схема трьохканального програмованого джерела струму	174
Додаток Д. Акти впровадження.....	175
Додаток Е. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	182

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

СЕС – сонячна електростанція

ВЕС – вітрова електростанція

БГЕ – біогазова електростанція

ГЕС – гідроелектростанція

РЕМ – розподільна електрична мережа

САК – система автоматичного керування

КЕЕС – комбінована електроенергетична система

ЕСУ – енергетична стратегія України

ЕС – енергетична система

ПЯЕ – показники якості електричної енергії

ФЕБ – фотоелектрична батарея

ЕГ – електрогенератор

ДВЗ – двигун внутрішнього згорання

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку енергетики України характеризується все більшим поширенням установок генерації електричної потужності з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ). За останні три роки, згідно даних Держенергоефективності України, частка ВДЕ в енергетичному балансі зросла в 1,5 рази.

Найбільшого розповсюдження набули сонячні (СЕС) та вітрові електростанції (ВЕС). На підприємствах агропромислового комплексу поширені установки з переробки біологічних відходів з подальшим виробництвом електроенергії – біогазові електростанції (БГЕ). Метою встановлення зазначених установок на промислових підприємствах є зниження плати за спожиту електроенергію за рахунок власного її виробництва. До того ж, продаж генерованої електроенергії за «зеленим» тарифом значно скорочує термін окупності установок генерації електроенергії з ВДЕ.

При застосуванні установок з ВДЕ на промислових підприємствах, точка їх підключення до розподільної електричної мережі (РЕМ), як правило, співпадає з точкою приєднання електроспоживачів. Це веде до того, що в режимі генерації електричної потужності відбувається підвищення напруги в точці приєднання установки генерації до мережі. Тому в режимі реверсивного потоку потужності в РЕМ можуть спостерігатися понаднормові завищені значення усталеного відхилення напруги.

Аналіз існуючих систем автоматичного керування (САК) установок з ВДЕ показує, що всі вони реалізують такий підхід до автоматичного керування, за якого обмежується рівень генерації активної потужності в мережу в залежності від фіксованого значення уставки по напрузі. Недоліком цього є зниження фінансових надходжень від продажу електроенергії за «зеленим» тарифом, що пов'язане зі зниженням рівня генерації активної потужності в мережу. Тому задача удосконалення САК установками з ВДЕ з

метою забезпечення максимального рівня генерації активної потужності цими установками за умов дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів до РЕМ є актуальною.

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

Основний зміст роботи складають результати досліджень, проведених автором протягом 2006-2018 р.р. Робота відповідає Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», зокрема п.п. 5 пункту 3 «Переліку пріоритетних тематичних напрямків наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року», а також направленості тематики науково-дослідних робіт кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту Центральноукраїнського національного технічного університету «Розробка енергозберігаючих режимів та енергетичного контролю для промисловості» (номер державної реєстрації № 0103U2006105).

Результати роботи використані в держбюджетній темі «Розробка та дослідження комплексної електроенергетичної системи з використанням нетрадиційних та поновлювальних джерел енергії для сільськогосподарського виробництва» (номер державної реєстрації № 0110U002140) та під час виконання НДР за грантом Кіровоградської обласної державної адміністрації і обласної ради для молодих науковців, договір №11/35Г213 «Оптимізація паливно-енергетичних балансів промислових та комунально-побутових об'єктів сільської місцевості з використанням альтернативних джерел енергії» (номер державної реєстрації №0113U007566). Автор брав участь у виконанні науково-дослідної роботи за грантом як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є забезпечення максимально можливого рівня генерації активної потужності установками з відновлюваними джерелами енергії за умов дотримання нормально

допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів до розподільної електричної мережі.

Для досягнення поставленої мети пропонується здійснити поліпшення характеристик САК шляхом визначення та зміни в режимі реального часу уставки обмеження потужності генерації установками з ВДЕ та вирішити наступні завдання:

1. Провести огляд існуючих методів та технічних засобів автоматичного керування установками генерації електричної потужності, що містять ВДЕ.
2. Формалізувати задачу автоматичного керування установками генерації електричної потужності, що містять ВДЕ.
3. Провести вибір методу розв'язання задачі автоматичного керування установками генерації електричної потужності, що містять ВДЕ.
4. Розробити структурну схему САК та алгоритм визначення вектора керування.
5. Створити комп'ютерну імітаційну модель САК установками генерації електричної потужності, що містять ВДЕ.
6. Запропонувати технічну реалізацію розробленої САК.
7. Провести експериментальне визначення ефекту від застосування розробленого алгоритму автоматичного керування установками генерації електричної потужності, що містять ВДЕ.

Об'єкт дослідження – процеси автоматичного керування в комбінованих електроенергетичних системах (КЕЕС) з відновлюваними джерелами енергії.

Предмет дослідження – система автоматичного керування установками генерації електричної потужності, що містять відновлювані джерела енергії.

Методи дослідження. Вирішення поставлених в роботі задач відбувалося за допомогою методів комп'ютерного імітаційного

моделювання, методів оптимізації, методів теорії електричних кіл, методів теорії автоматичного керування, чисельних методів розв'язку задач.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше поставлена та розв'язана задача автоматичної зміни уставки обмеження потужності генерації установками з відновлюваними джерелами енергії, що працюють в комбінованій електроенергетичній системі.

2. Отримав подальший розвиток метод розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації шляхом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв для формалізації задачі автоматичного керування генерацією активної потужності установками з відновлюваними джерелами.

3. Удосконалено імітаційні моделі системи автоматичного керування установками генерації електричної потужності, що містять відновлювані джерела енергії, які, на відміну від існуючих, дозволяють проводити аналіз режимів роботи розподільних електричних мереж за умов забезпечення максимального рівня генерації активної потужності установками з відновлюваними джерелами енергії при дотриманні нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів до розподільної електричної мережі.

Практичне значення одержаних результатів полягає в забезпеченні максимального рівня генерації електричної потужності установками з ВДЕ:

На основі наукових положень створено:

- комп'ютерну імітаційну модель САК установками генерації електричної потужності, що містять ВДЕ;
- методику визначення вектора керування установками генерації електричної потужності, що містять ВДЕ.

Отримані в дисертаційній роботі наукові результати впроваджено в ТОВ «Електроактив-монтаж» та ТДВ «Інтерресурси», що підтверджено відповідними актами впровадження результатів наукових досліджень. Розроблена комп'ютерна імітаційна модель САК установками генерації

електричної потужності, що містять ВДЕ, використовується в навчальному процесі на кафедрі «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент» ЦНТУ для підготовки фахівців за напрямом 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», що засвідчено актом використання результатів дисертаційної роботи в навчальному процесі.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем одноосібно. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві, наступний: [8] – запропоновано інтерпретувати задачу автоматичного керування режимом роботи КЕЕС з ВДЕ у вигляді задачі багатокритеріальної оптимізації, запропоновано адаптувати метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв для вирішення зазначеної задачі; [72] – запропоновано знаходити кінцевий розв’язок задачі багатокритеріальної оптимізації шляхом мінімізації відстані від утопічної точки до парето-оптимальної множини розв’язків у просторі критеріїв; [73] – обґрунтовано доцільність застосування СЕС, ВЕС, БГЕ в рамках КЕЕС для електропостачання підприємств агропромислового комплексу України; [74] – розроблено математичні моделі оптимальних режимів вироблення та споживання електроенергії в КЕЕС з ВДЕ; [75] – запропонована методика вибору елементів КЕЕС з ВДЕ; [76] – запропонована структура математичної моделі фотоелектричної батареї як джерела електричної енергії; [77] – розроблені комп’ютерні імітаційні моделі джерел ВДЕ, що входять до складу КЕЕС; [78] – сформульовано підхід до підвищення енергоефективності підприємств агропромислового сектору для умов центрального регіону України за рахунок впровадження КЕЕС з ВДЕ; [79] – проведено порівняння даних про сонячну радіацію за результатами багаторічних спостережень із даними SSE NASA; [81] – формалізовано задачу автоматичного керування режимами роботи КЕЕС з ВДЕ у вигляді задачі багатокритеріальної оптимізації; [82] – розроблена комп’ютерна імітаційна модель САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС; [83] – розв’язки задачі

автоматичного керування генерацією потужності ВДЕ в КЕЕС; [84] – запропонована методика вибору структури КЕЕС з ВДЕ; [85] – визначено основні шляхи оптимізації складових паливно-енергетичних балансів КЕЕС з ВДЕ; [86] – запропоновано спосіб сумісного живлення електроспоживачів від системи електропостачання з ВДЕ, що працюють паралельно з мережею.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційних досліджень доповідались та обговорювалися на науково-технічних конференціях: V Міжнародна науково-практична конференція «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні», м. Львів 2-3 квітня 2009 року; Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», м. Тернопіль 21-22 грудня 2010 року; Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті», м. Кропивницький 16-17 листопада 2017 року; II Міжнародна науково-практична конференція «Прикладні науково-технічні дослідження», м. Івано-Франківськ 3-5 квітня 2018 року; Всеукраїнська науково-практична інтернет конференція «Перспективні напрямки інформаційних і комп'ютерних систем та мереж, комп'ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті», м. Кропивницький 13-14 листопада 2018 року; Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві» (АКІТ-2018), м. Кропивницький 15-16 листопада 2018 року.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць, із них: 10 статей у наукових фахових виданнях, з яких 2 статті у фахових виданнях України, занесених до міжнародних наукометричних баз (Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, CiteFactor, Polish Scholarly Bibliography, ВІНІТІ (Російська академія наук)), 1 зарубіжна публікація у

виданні, що індексується в наукометричній базі Index Copernicus; 6 робіт у збірниках праць конференцій; 1 патент.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації складає 185 сторінок, з яких 20 сторінок містять 6 додатків. Основна частина викладена на 133 сторінках друкованого тексту, містить 71 рисунок та 4 таблиці. Список використаних джерел містить 113 джерел та викладений на 12 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГЕНЕРАЦІЄЮ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В КОМБІНОВАНІЙ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ

Характерною рисою сучасного етапу розвитку енергетики в Україні є стрімке зростання частки ВДЕ в балансі енергетичної системи [1]. Переваги такого напрямку розвитку енергетики є очевидні. Проте, із значним зростанням встановлених потужностей установок розподіленої генерації з ВДЕ спостерігається і ряд негативних явищ [2-9]. Найбільш суттєвим з них є збільшення рівня усталеного відхилення напруги в розподільних електричних мережах в режимах реверсивного потоку потужності.

Одним із перспективних шляхів вирішення даної проблеми є удосконалення САК генерацією активної потужності установками з ВДЕ з метою забезпечення максимально можливого рівня генерації активної потужності установками з ВДЕ за умов дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів до розподільної електричної мережі [8-9].

Для цього необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналітичний огляд сучасного стану питання розвитку відновлюваної енергетики в Україні;
- провести аналіз існуючих методів та технічних засобів підключення установок генерації електроенергії з ВДЕ до електричної мережі;
- здійснити аналітичний огляд методів та технічних засобів автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в комбінованій електроенергетичній системі (КЕЕС) з метою виявлення їх недоліків.

Вирішенню даних питань присвячений перший розділ роботи.

1.1 Сучасний стан розвитку відновлюваної енергетики в Україні

Одним із пріоритетних напрямків розвитку електроенергетики України, що визначаються Енергетичною стратегією України до 2035 року (ЕСУ) [1] є стимулювання зростання частки генерації електричної енергії за рахунок ВДЕ (на рівні не меншому 19,5 %). Планові темпи зростання генерації електроенергії, передбачені ЕСУ, в тому числі і за рахунок ВДЕ, приведені в табл. 1.1 [1].

Таблиця 1.1. Прогноз виробництва електроенергії в Україні до 2035 року

№ з/п	Тип електростанції	Виробництво електроенергії, ГВт·год				
		2015 р.	2020 р.	2025 р.	2030 р.	2035 р.
1.	АЕС	87,6	85	91	93	94
2.	ТЕС/ТЕЦ	67,5	60	64	63	63
3.	ГЕС	7	10	12	13	13
4.	СЕС, ВЕС	1,6	9	12	18	25
	Всього	163,7	164	178	185	195

Як видно з табл. 1.1, основна роль у виробництві електроенергії за рахунок ВДЕ відводиться розподіленій генерації на основі СЕС, ВЕС, ГЕС. Це пов'язано, в першу чергу, з кліматичними та географічними умовами території України, за яких економічно доцільний потенціал саме цих видів ВДЕ є найбільшим.

На даний момент в Україні прийнятий ряд змін до законодавчих актів, що покликані стимулювати розвиток галузі ВДЕ. Слід зазначити, що одним із основних стимулів, що сприяли стрімкому розвитку галузі відновлюваної енергетики, є удосконалення механізму «зеленого» тарифу, що передбачений в Законі України «Про електроенергетику» [10].

Так, за I півріччя 2018 р. в Україні встановлено майже 270 МВт нових потужностей, що генерують електроенергію за рахунок ВДЕ за «зеленим»

тарифом [11, 12]. Це перевищує загальний обсяг потужностей, встановлених як за 2017 рік (257 МВт), та так і за 2016 рік (121 МВт). Дані про динаміку зростання встановленої потужності нових об'єктів генерації електроенергії за рахунок ВДЕ в Україні за 2015-2018 роки приведені в табл. 1.2 [11, 12].

Таблиця 1.2. Встановлена потужність нових об'єктів відновлюваної енергетики в Україні за 2015-2018 роки

№ з/п	Період	Встановлена потужність, МВт				
		СЕС	ВЕС	БГЕ	Малі ГЕС	Разом
1.	2015 р.	21	0	3	6	30
2.	2016 р.	99	12	7	3	121
3.	2017 р.	211	27	14	5	257
4.	I квартал 2018 р.	206	50	12	1	269

Як видно з табл. 1.2 найбільша частка нових введених потужностей припадає на СЕС та ВЕС. Дещо менший обсяг нових введених потужностей спостерігається для електростанцій, що генерують електроенергію з біогазу та біомаси (БГЕ). Найменший приріст встановлених потужностей спостерігається для малих ГЕС, що пов'язано перш за все з особливостями застосування даного виду ВДЕ. Такі тенденції розподілу нових потужностей обумовлені, перш за все, рівнем ставок «зелених» тарифів за видами ВДЕ.

Загалом, з початку 2015 р. по кінець II кварталу 2018 р. в експлуатацію введено 677 МВт нових потужностей об'єктів відновлюваної електроенергетики [11, 12]. Дані про динаміку зростання сумарної встановленої потужності об'єктів електроенергетики з початку 2014 р. по I квартал 2018 р., що працюють за «зеленим» тарифом, наведено на рис. 1.1 у вигляді гістограми. [11, 12].

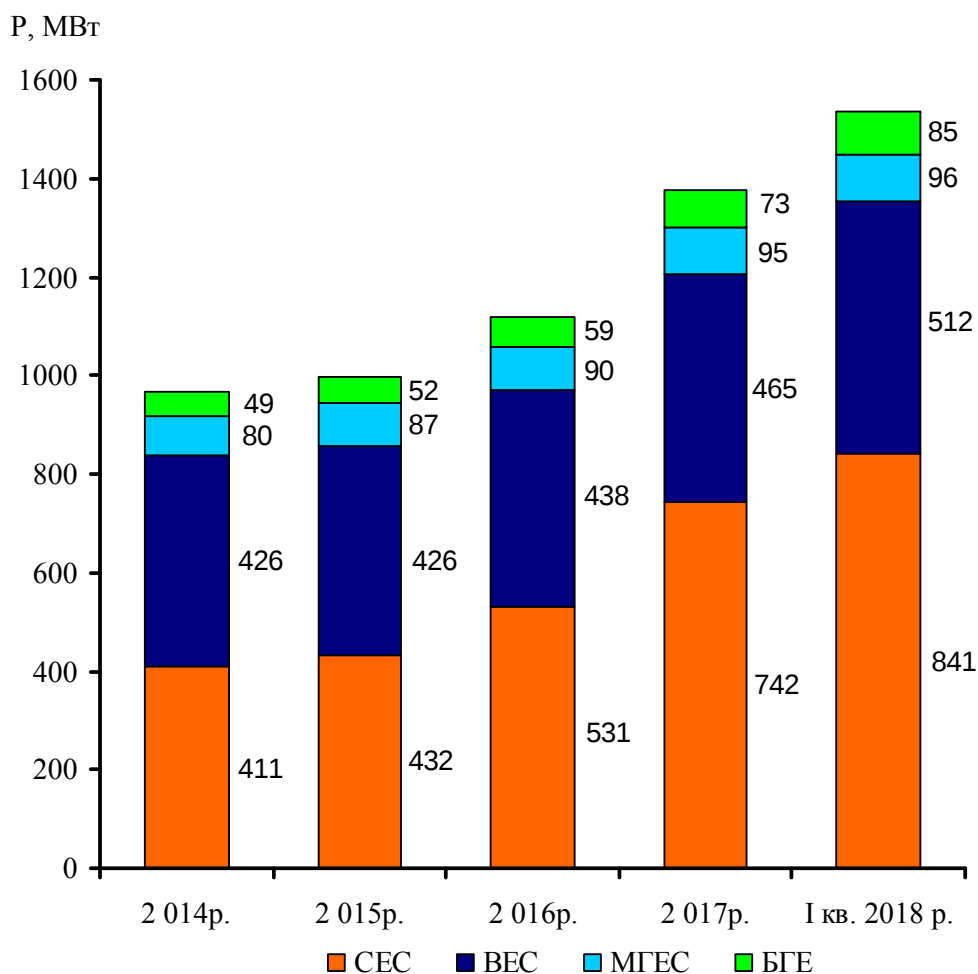


Рис. 1.1. Динаміка зміни встановленої потужності об'єктів відновлюваної електроенергетики України, що працюють за «зеленим» тарифом

Як видно з рис. 1.1, станом на I квартал 2018 р. сумарна встановлена потужність об'єктів відновлюваної електроенергетики, яким встановлено «зелений» тариф, становить 1,534 ГВт, що на 37 % більше, ніж на кінець 2014 р. Це свідчить про стійку позитивну тенденцію до зростання частки електроенергії, виробленої установками з ВДЕ в загальному обсязі.

Проведений аналіз літературних джерел [13-23] показав, що відповідно до мети встановлення установок з ВДЕ, їх можна умовно поділити на три групи (рис. 1.2):

- індивідуальні установки з ВДЕ малої потужності (до 30 кВт);
- комерційні установки з ВДЕ середньої потужності (30 кВт ... 1 МВт);
- промислові установки з ВДЕ великої потужності (понад 1 МВт).

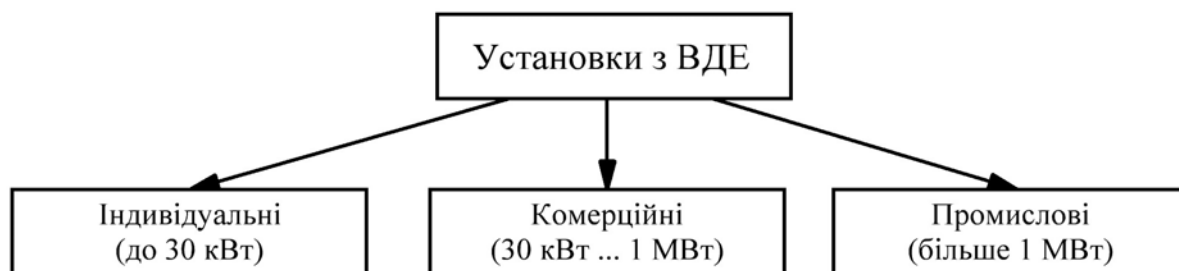


Рис. 1.2. Класифікація установок з ВДЕ

Установки першого типу призначені, перш за все, для забезпечення безперебійного електропостачання споживачів. Тому до складу систем з такими установками, як правило, входять накопичувачі енергії (аккумуляторні батареї) або автономні генератори електроенергії на традиційному паливі (дизельні, бензинові тощо). Більшість індивідуальних установок з ВДЕ використовують один (СЕС або ВЕС), рідше – два види ВДЕ. Також з допомогою таких установок з ВДЕ можливо зменшити рівень споживання електроенергії від енергосистеми за умови підключення їх на паралельну роботу з мережею. В такому випадку, індивідуальні установки з ВДЕ підключаються до мережі напругою 0,4 кВ. Проте, зважаючи на відносно малу встановлену потужність індивідуальних установок з ВДЕ, їх вплив на режим роботи РЕМ, а саме на рівні усталеного відхилення напруги в точці приєднання до мережі, практично відсутній.

Потужні промислові установки з ВДЕ призначені для генерації електроенергії в енергосистемі в промислових масштабах. Це, як правило, СЕС або ВЕС потужністю від одного до десятків МВт. Зважаючи на їх значну потужність, дані установки підключаються до електричної мережі за допомогою потужних підвищувальних трансформаторів напругою 35-110 кВ. Тому, такі електростанції з ВДЕ можна вважати електрично віддаленими від електроспоживачів РЕМ. З цієї причини їх впливом на рівні усталеного відхилення напруги в точках приєднання електроспоживачів до РЕМ можна знехтувати.

Комерційні установки з ВДЕ середньої потужності призначені в першу чергу для зменшення рівня споживання електричної енергії потужними індивідуальними споживачами та промисловими підприємствами. Характерною їх відмінністю від індивідуальних установок з ВДЕ є відсутність накопичувачів електроенергії (акумуляторних батарей). Тому, такі установки завжди працюють паралельно з мережею. З метою зниження негативного впливу від нерівномірності потоку первинних енергетичних ресурсів ВДЕ (інтенсивність сонячного випромінювання, швидкість вітру, надходження біомаси і т.д.), в комерційних установках доцільно застосовувати декілька видів ВДЕ сумісно, в рамках комбінованих електроенергетичних систем (КЕЕС) з ВДЕ.

Як правило, підключення цих установок до РЕМ здійснюється у вузлах номінальною напругою 0,4-10 кВ, тобто в безпосередній близькості до електроспоживачів. На рис. 1.3 приведена узагальнена схема КЕЕС з установками з ВДЕ.

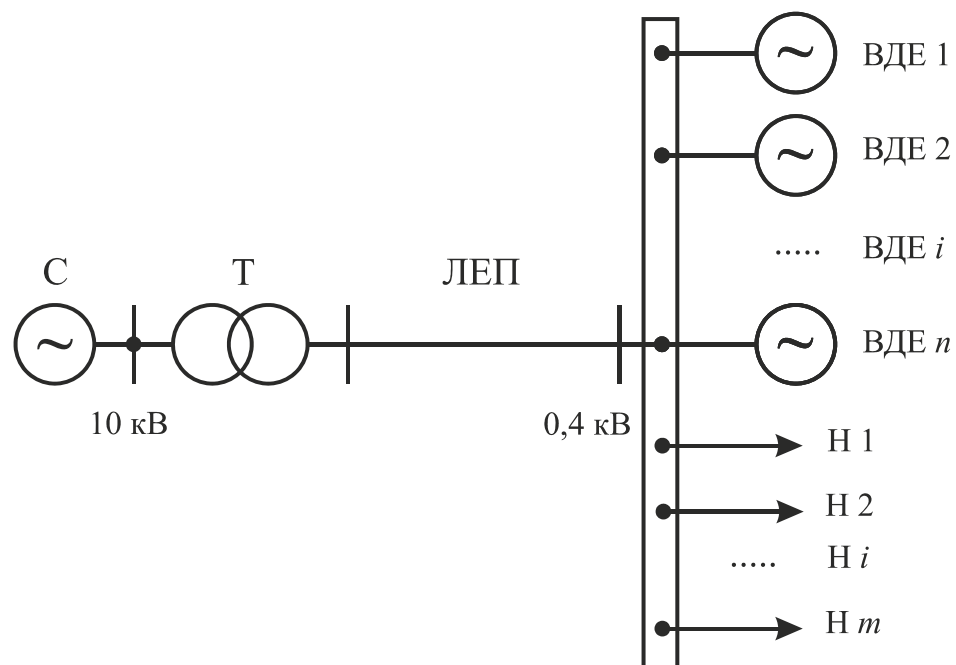


Рис. 1.3. Узагальнена схема комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії

На рис. 1.3:

С – районна електрична мережа;

Т – силовий трансформатор з номінальною напругою 10/0,4 кВ;

ЛЕП – лінія електропередачі (кабельна або повітряна);

H_1-H_m – електричне навантаження (споживачі електричної енергії);

$ВДЕ_1-ВДЕ_n$ – установки генерації електроенергії з ВДЕ.

Під час роботи комерційних установок з ВДЕ можуть виникати режими зворотної генерації, при яких електрична енергія від установок з ВДЕ протікає в розподільну електричну мережу. Це, безперечно, є позитивним фактором у разі використання підприємством «зеленого» тарифу. Проте у випадку співрозмірної потужності трансформатора Т і установок з ВДЕ останні суттєво впливають на параметри режиму роботи РЕМ в точці їх підключення, а саме на рівні усталеного відхилення напруги. Так, для схеми мережі на рис. 1.3 значення напруги в точці приєднання електроспоживачів для режиму генерації активної енергії в мережу від установок з ВДЕ спрощено (без врахування поперечної складової спаду напруги та втрат потужності в ЛЕП) можна визначити за формулою [24]:

$$U_{ш} = U_1 - \Delta U_{л} = U_1 - \frac{-P_{ген}}{U_{ном}^2} r_{л} \quad (1.1)$$

де $U_{ш}$ – напруга в точці приєднання ВДЕ;

U_1 – напруга на початку ЛЕП;

$\Delta U_{л}$ – величина спаду напруги в ЛЕП (для режиму генерації потужності в мережу дане значення буде від'ємним);

$P_{ген}$ – величина генерованої потужності в мережу;

$U_{ном}$ – номінальна напруга мережі;

$r_{л}$ – активний опір лінії електропередачі.

Як видно з виразу (1.1), зі збільшенням рівня генерації потужності $P_{ген}$ від установок ВДЕ в мережу збільшується і рівень напруги $U_{ш}$ на затискачах

електроспоживачів. В зв'язку з цим в режимах максимальної генерації електричної потужності від ВДЕ в мережу можуть спостерігатися понаднормові значення усталеного відхилення напруги в точці їх приєднання до РЕМ, що співпадає з точкою приєднання електроспоживачів до мережі. Такі понаднормові значення усталеного відхилення напруги негативно впливають на електроспоживачів, що призводить до зниження надійності їх роботи, скорочення терміну експлуатації, і, як наслідок, до появи значних економічних збитків [25-27].

Існує декілька шляхів вирішення даної проблеми, основними з яких є наступні:

- заходи, пов'язані з підвищенням пропускної здатності елементів розподільних мереж;
- заходи з обмеження рівня генерації електричної потужності від установок з ВДЕ.

Заходи, спрямовані на підвищення пропускної здатності елементів РЕМ пов'язані з реконструкцією РЕМ (заміна силових трансформаторів на більш потужні, заміна кабельних та повітряних ліній на лінії з більшим перерізом і т.д.), і тому вимагають значних капітальних вкладень з боку власника установок з ВДЕ. Недоліком такого підходу є значне збільшення терміну окупності установок з ВДЕ, і, як наслідок, зниження їх економічної ефективності.

Обмеження рівня генерації електричної потужності від установок з ВДЕ призводить з одного боку до недоотримання коштів від продажу електроенергії в мережу по «зеленому» тарифу, а з іншого – до зменшення економічних збитків від понаднормових значень усталеного відхилення напруги.

Зважаючи на це, перспективним видається підхід до автоматичного керування генерацією активної потужності установками з ВДЕ, за якого максимальний рівень генерації електричної потужності в мережу визначався б із урахуванням значення прибутку від продажу електроенергії за «зеленим»

тарифом та значення економічних збитків від понаднормових відхилень напруги.

Реалізація такого підходу можлива за рахунок удосконалення САК генерацією активної потужності установками з ВДЕ. Тому, перш за все, необхідно провести аналітичний огляд існуючих методів та технічних засобів підключення установок з ВДЕ до електричної мережі з метою визначення можливостей їх впливу на рівні генерації електричної потужності та на значення усталеного відхилення напруги в точці їх приєднання до РЕМ.

1.2 Аналітичний огляд методів та технічних засобів підключення установок генерації електроенергії з ВДЕ до електричної мережі

У випадку сумісного використання декількох різномірних джерел електроенергії на основі ВДЕ в рамках КЕЕС спостерігається зниження добової нерівномірності вироблення електроенергії такою системою [14-17]. Це, безперечно, є перевагою КЕЕС в порівнянні з генеруючими установками, що працюють на відновлюваному ресурсі одного виду.

Як зазначалось в попередньому параграфі, для умов території України найбільший економічно доцільний потенціал серед ВДЕ мають сонячна, та вітрова енергія. Саме тому основна частка вироблення електроенергії за рахунок ВДЕ припадає на СЕС та ВЕС. Дещо менші об'єми виробленої електроенергії припадають на БГЕ, адже такі електростанції вимагають наявності ресурсу для виготовлення біомаси або біогазу. Тому найчастіше БГЕ зустрічаються на підприємствах агропромислового комплексу, в яких біологічна сировина є відходами основного виробництва.

Враховуючи вищесказане, можна зробити висновок, що для умов території України найдоцільніше комерційні КЕЕС створювати на основі СЕС, ВЕС та БГЕ. Тому необхідно провести аналіз методів та технічних засобів підключення в мережу саме для вказаних установок генерації електроенергії з ВДЕ.

1.2.1. Аналіз існуючих методів та технічних засобів підключення СЕС до електричної мережі. СЕС – це електрогенеруюча установка, в якій використовується спосіб прямого перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію. Узагальнена функціональна схема СЕС, що працює паралельно з мережею, наведена на рис. 1.4.

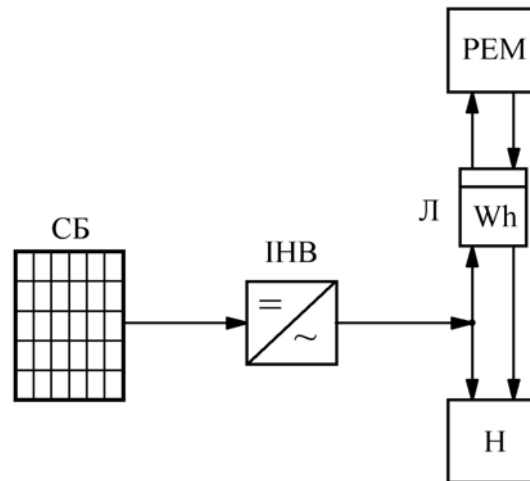


Рис. 1.4. Функціональна схема СЕС, що працює паралельно з електричною мережею

На рис. 1.4:

СБ – сонячна батарея;

ІНВ – сонячний інвертор;

Л – двонаправлений лічильник активної електроенергії;

РЕМ – розподільна електрична мережа;

Н – електричне навантаження.

Енергія сонячного випромінювання з допомогою фотоелектричних панелей перетворюється в постійний струм, потужність визначається [13-15]:

$$P_{CB} = N_{\text{series}} N_{\text{parallel}} U_{\text{х.х.}} I_{\text{к.з.}} F_{\Phi} \quad (1.2)$$

де P_{CB} – електрична потужність, що генерується сонячними батареями;

N_{series} – кількість послідовно з'єднаних фотоелементів у складі батареї;

N_{parallel} – кількість паралельно з'єднаних фотоелементів у складі батареї;

$U_{\text{x.x.}}$ – значення напруги неробочого ходу;

$I_{\text{к.з.}}$ – значення струму короткого замикання;

F_{Φ} – коефіцієнт заповнення вольт-амперної характеристики для конкретного типу фотоелементу.

Необхідною умовою підключення будь-яких електрогенеруючих установок до мережі, в тому числі і установок з ВДЕ, є виконання вимог що до узгодження їх електричних параметрів (величина і форма напруги, частота струму та ін. [28, 29]) з відповідними параметрами електричної мережі. Тому, одним із основних елементів СЕС є інвертор напруги, який слугує для перетворення постійного струму від сонячних батарей в систему напруг змінного струму промислової частоти, що дає можливість працювати СЕС паралельно з електричною мережею. Слід зазначити, що в більшості сучасних сонячних інверторів наявна функція відстеження точки максимальної потужності, яка може бути відібрана від сонячних панелей (MPPT-трекінг), що значно підвищує ефективність використання СЕС.

Стрімкий розвиток силової напівпровідникової електроніки та мікропроцесорної техніки сприяв створенню широкого спектру інверторів СЕС, які відрізняються між собою за функціональним призначенням та сферою застосування [30 – 32]. Класифікація інверторів, що призначені для використання в складі СЕС, наведена на рис. 1.5.

Автономні (акумуляторні) інвертори використовуються в індивідуальних установках з ВДЕ малої потужності з акумуляторними батареями, і не призначені для підключення до централізованої електричної мережі. Для побудови КЕЕС, до складу яких входить СЕС, зазвичай застосовують мережеві сонячні інвертори, які мають функцію автоматичної синхронізації параметрів електроенергії (амплітуди напруги, частоти та ін.) з аналогічними параметрами електричної мережі. Також для даних цілей можливо застосовувати гібридні (акумуляторно-мережеві) інвертори, проте



Рис. 1.5. Класифікація інверторів, що застосовуються в СЕС

їх вартість дещо більша в порівнянні з мережевими інверторами, і тому їх доцільно застосовувати сумісно з акумуляторними батареями лише у випадку підвищених вимог щодо безперебійності електропостачання.

В залежності від форми вихідного сигналу розрізняють інвертори синусоїдного типу (генерують вихідний сигнал практично без спотворень синусоїдальності форми кривої) та інвертори з модифікованою синусоїдою, вихідний сигнал яких по формі близький до меандру. Незважаючи на значно нижчу вартість інверторів з модифікованою синусоїдою в порівнянні з інверторами синусоїдного типу, область їх застосування значно обмежена через притаманний їм суттєвий недолік – значне спотворення синусоїдальності форми кривої вихідної напруги. Наявність в спектрі напруги значних рівнів вищих гармонік негативно впливає на більшість електроприймачів, особливо на установки з асинхронним електроприводом, та батареї статичних конденсаторів [25 – 27]. Тому для СЕС, що входять до складу КЕЕС найдоцільніше застосовувати мережеві інвертори, що забезпечують синусоїдну форму вихідної напруги.

В залежності від кількості сонячних батарей в СЕС та їх потужності відрізняються і їх схеми приєднання до електричної мережі. Кожен з

варіантів схем приєднання сонячних батарей має свої переваги та недоліки, і вимагає застосування певного типу сонячного інвертора.

На рис. 1.6 приведені найбільш поширені схеми приєднання сонячних батарей до електричної мережі.

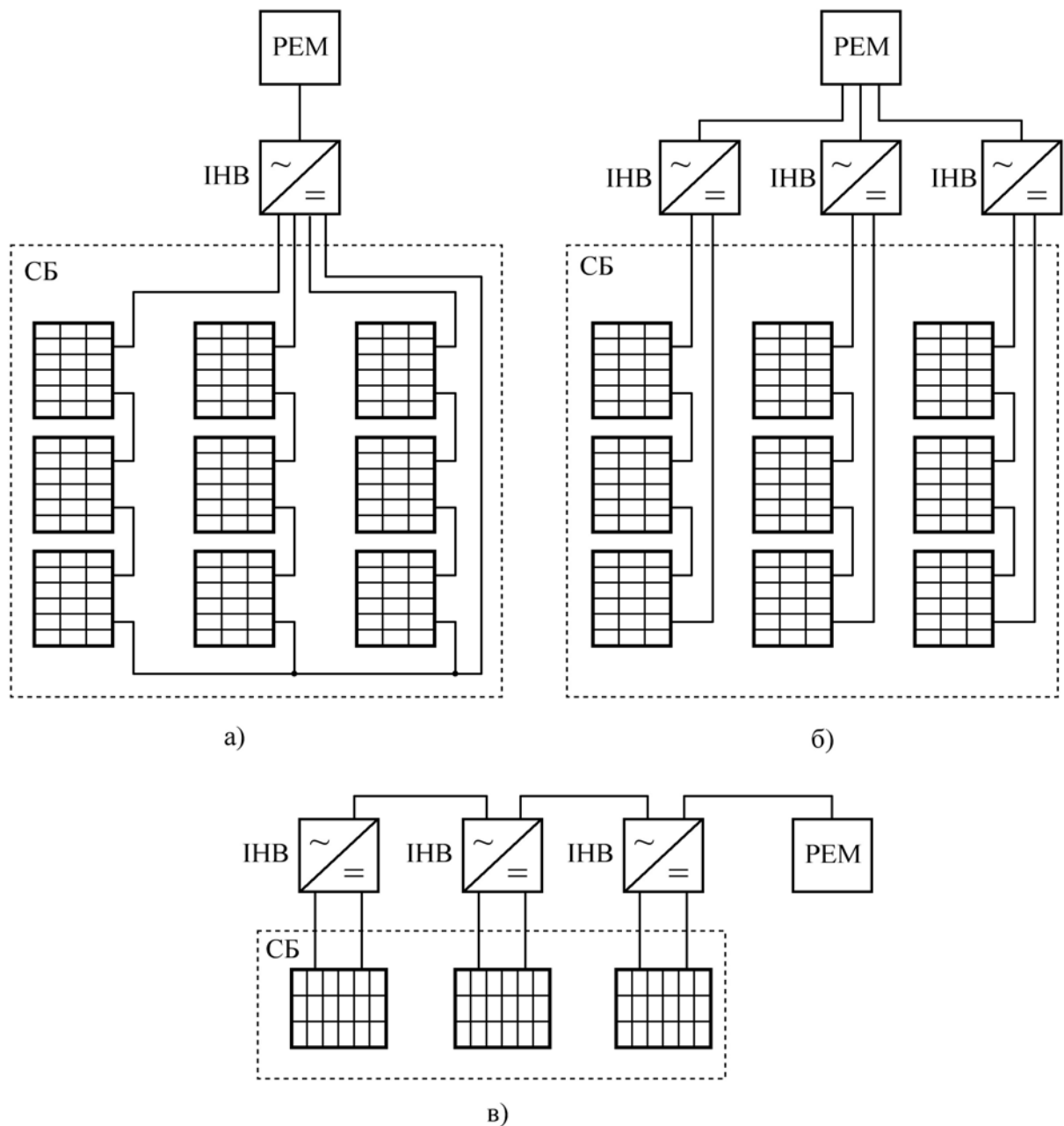


Рис. 1.6. Варіанти схем приєднання різних типів сонячних інверторів до електричної мережі:

а) схема з центральним інвертором; б) схема зі стрінг інверторами;

в) схема з мікроінверторами

На рис. 1.6 а) приведена схема підключення сонячних батарей з допомогою центрального інвертора. За такого підходу всі сонячні батареї, в залежності від їх потужності, групуються в масиви шляхом послідовного з'єднання. Далі кожен з цих масивів під'єднується до одного інвертора зі сторони постійного струму, а вихід інвертора підключається до шин РЕМ.

Перевагами такого способу приєднання є порівняно низька вартість питомої встановленої потужності інверторів СЕС, відносна простота конструкції та обслуговування. Проте такому варіанту схеми притаманний ряд суттєвих недоліків, основними з яких є: високі спади напруги та втрати потужності в мережі постійного струму, через значну протяжність з'єднувальних проводів між сонячними батареями та інвертором; різкі коливання виробленої потужності в разі затінення частини сонячних батарей; низька надійність та гнучкість; єдиний МРРТ-трекер для всіх сонячних батарей, що значно знижує ефективність використання СЕС при наявності в ній сонячних батарей декількох типів.

Більшість описаних недоліків схеми з центральним інвертором відсутні при використанні схеми з мікроінверторами, що приведена на рис. 1.6 в. Така схема приєднання передбачає наявність інвертора для кожної з сонячних батарей, розміщеного в безпосередній близькості від них. Через скорочення довжини провідників постійного струму та наявності в кожному інверторі функції МРРТ-трекінгу така схема має найбільшу стійкість до ефекту часткового затінення та максимально ефективно використовує потужність кожної з сонячних панелей. Проте, дана схема має високу вартість питомої встановленої потужності мікроінверторів в порівнянні з інверторами інших типів. До того ж, при встановленій потужності СЕС порядку декількох десятків кВт значно ускладнюється її обслуговування через наявність великої кількості мікроінверторів, потужність кожного з яких становить 50...500 Вт. Тому сфера застосування схеми з мікроінверторами обмежується лише СЕС малої потужності, і використання її в складі КЕЕС є недоцільним.

На рис. 1.6 б) наведено схему підключення сонячних батарей з допомогою стрінг інверторів. В ній, на відміну від схеми з центральним інвертором, кожен з масивів сонячних батарей приєднується до окремого стрінг інвертора. Це дає змогу зменшити рівень спадів напруг та втрат потужності в мережі постійного струму за рахунок меншої довжини провідників від сонячних батарей до інверторів. До того ж, кожен з інверторів оснащений MPPT-трекером, що знижує чутливість СЕС до затінення частини сонячних батарей СЕС. Незважаючи на дещо більшу вартість питомої встановленої потужності стрінг інвертора в порівнянні з центральним, завдяки вказаним перевагам саме даний тип інверторів найдоцільніше застосовувати при побудові СЕС, що входять до складу комерційних КЕЕС.

1.2.2. Аналіз методів та технічних засобів підключення ВЕС до електричної мережі. Принцип дії ВЕС полягає у перетворенні кінетичної енергії вітрового потоку в механічну енергію обертання вітроколеса, з'єднаного з ротором електрогенератора, в якому вона перетворюється в електричну енергію. Потужність ВЕС визначається виразом [33]:

$$P_{BEC} = \frac{1}{2} \rho_{\text{п}} \pi R^2 u^3 C_p(\lambda) \eta_{\text{м.п.}} \eta_{\text{е.г.}} \quad (1.3)$$

де P_{BEC} – електрична потужність, що генерується ВЕС;

$\rho_{\text{п}}$ – густина повітря;

R – радіус вітроколеса;

u – швидкість вітру;

$C_p(\lambda)$ – коефіцієнт потужності вітроколеса;

$\eta_{\text{м.п.}}$ – коефіцієнт корисної дії механічної передачі;

$\eta_{\text{е.г.}}$ – коефіцієнт корисної дії електрогенератора.

Значення коефіцієнта потужності C_p залежить від швидкохідності вітроколеса λ , що визначається як відношення лінійної швидкості кінців

лопаті до швидкості вітру. Для кожного конкретного конструктивного типу вітроколеса існує своя залежність $C_p(\lambda)$, яка досягає максимального значення при деякому оптимальному значенні швидкохідності. При цьому відбір потужності від вітрового потоку буде максимальним [33-38].

ВЕС, як і СЕС можуть бути застосовані як в складі автономних систем, так і працювати паралельно з електромережею в складі КЕЕС. При цьому, як і для випадку СЕС, параметри електроенергії (амплітуда напруги, частота та ін.), що генеруються ВЕС, повинні бути синхронізовані з відповідними параметрами електромережі.

Основною умовою ефективного використання вітроенергетичного ресурсу є відповідність швидкості вітру і частоти обертання вітроколеса. Зміна швидкості вітру вимагає відповідно широкого діапазону зміни швидкості обертання вала електрогенератора. Дана залежність встановлюється величиною швидкохідності [13], що обумовлена конструкцією вітроколеса. Альтернативою є підтримання стабільної частоти обертання (або дуже вузького діапазону) ротора електрогенератора. Але при цьому значна частина енергії вітру залишиться невикористаною, що знижує ефективність таких установок. За цих умов визначальним для електрогенератора ВЕС є допустимість зміни діапазону швидкості обертання за умови синхронізації параметрів виробленої електроенергії з відповідними параметрами мережі.

Схеми приєднання ВЕС до електричної мережі різняться в залежності від типу електрогенератора. На рис. 1.7 наведено найбільш розповсюджені схеми приєднання ВЕС до електричної мережі [37-40].

На рис. 1.7:

ВК – вітроколесо;

Р – редуктор (мультиплікатор);

АГ – асинхронний генератор;

БК – батарея конденсаторів;

Р – змінні резистори в колі ротора АГ;

ПЧ – перетворювач частоти;

СГ – синхронний генератор;

РЕМ – розподільна електрична мережа.

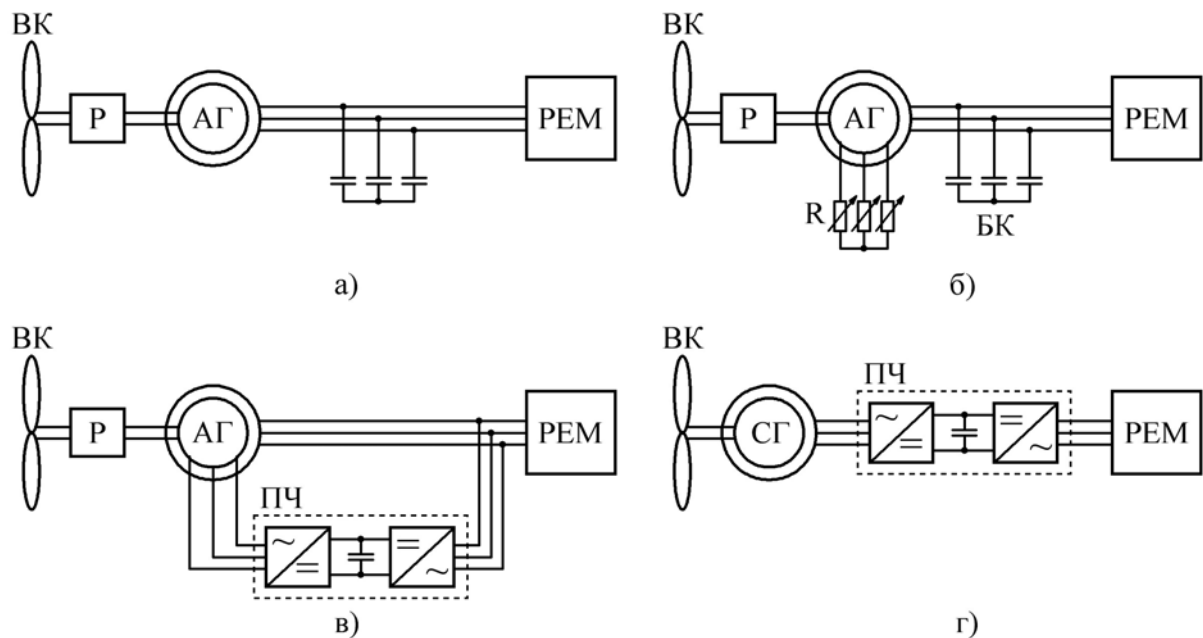


Рис. 1.7. Схеми приєднання ВЕС до електричної мережі

На рис. 1.7 а) наведено схему приєднання ВЕС, до складу якої входить вітряна турбіна та асинхронний генератор з короткозамкненим ротором, що безпосередньо приєднаний до електромережі. Діапазон потужності асинхронного генератора, що застосовуються для ВЕС, може складати від десятків кВт до кількох МВт. Основними перевагами даної схеми приєднання є її порівняно низька вартість, простота експлуатації та кращі масо-габаритні показники [39].

Але в даних типах установок суттєво ускладнюється керування режимними параметрами (величиною напруги і частоти), що є необхідним при різкій і сильній зміні частоти обертання вітроколеса під час поривчастого вітру, а також при різкій зміні величини електричного навантаження [34, 39].

Більш досконалим є варіант застосування в ВЕС асинхронного генератора з фазним ротором змінного опору, відповідна схема приведена на (рис. 1.7 б). Вітряні турбіни такого типу оснащені системою керування величиною ковзання частоти обертання ротора генератора. Така система дозволяє короткочасно (на час, що необхідний для зміни кута повороту лопатей турбіни) підтримувати потужність генерації в мережу близькою до їх номінального значення при різких змінах швидкості обертання вітроколеса. Це відбувається за рахунок зміни ковзання частоти обертання ротора генератора шляхом підключення або відключення резисторів в коло обмотки ротора. Завдяки системі керування величиною ковзання, частота обертання вала асинхронного генератора даного типу може змінюватись в більш широкому діапазоні, ніж у випадку асинхронного генератора з короткозамкненим ротором [33, 34].

Завдяки відносній простоті конструкції і порівняно низькій вартості, ВЕС із асинхронними генераторами з прямим приєднанням до електромережі, набули значного розповсюдження, в тому числі і на території України.

Основним недоліком асинхронного генератора з короткозамкненим ротором є високий рівень споживання ним реактивної потужності для створення магнітного поля збудження, що спричиняє додаткові втрати потужності в електромережі. До того ж, висока номінальна швидкість обертання вала асинхронного генератора вимагає застосування редуктора з високим коефіцієнтом перетворення, що знижує надійність роботи даної установки. Окрім цього у випадку приєднання ВЕС даного типу до електричної мережі з відносно низькою пропускну здатністю, в останній виникають суттєві коливання напруги при появі різких поривів вітру за рахунок недостатньої швидкодії систем зміни кута атаки лопатей вітроколеса [33, 34].

Більш досконалим є варіант схеми приєднання ВЕС до електричної мережі, що зображений на рис. 1.7 в). В даній схемі система керування

величиною ковзання частоти асинхронного генератора реалізована на основі перетворювача частоти, який вмикається в коло ротора. При цьому статор асинхронного генератора приєднаний до електромережі напругу.

Така схема дозволяє отримати стабільні параметри електроенергії на виході генератора (величину напруги і частоту) в широкому діапазоні зміни швидкості обертання вітроколеса. Однак регулювання вихідної потужності, так само залишається ускладненим. До того ж вартість такого варіанту ВЕС є суттєво більшою, в порівнянні з вищеописаними варіантами [33, 34].

Тому застосування ВЕС з асинхронними генераторами у складі КЕЕС є недоцільним.

Більш перспективним видається застосування синхронних машин в якості генераторів ВЕС, що працюють в складі КЕЕС. Регулювання напруги в синхронних генераторах відбувається відносно легко за рахунок зміни струму збудження обмотки ротора [40-44]. До того ж, синхронні генератори, на відміну від асинхронних, можуть генерувати реактивну потужність в мережу, що сприяє зменшенню втрат електроенергії.

Але такі генератори вимагають жорсткої стабілізації частоти обертання ротора генератора і, відповідно, вітроколеса. Це знижує ефективність використання енергії вітру в широкому діапазоні робочих швидкостей. За умов нестабільного поривчастого вітру значно погіршується стійкість роботи таких генераторів, під'єднаних паралельно до електромережі. Цей факт не дозволяє застосовувати схеми з прямим підключенням синхронних генераторів до електричної мережі, особливо в районах з різким і поривчастим вітром. До того ж із збільшенням встановленої потужності синхронного генератора погіршуються масо-габаритні показники ВЕС в цілому, за рахунок збільшення маси самого генератора, мультиплікатора, вітроколеса.

Даний недолік усувається за рахунок використання тихохідних синхронних генераторів. Вал такої синхронної машини з'єднується з вітроколесом безпосередньо, тому відпадає необхідність в застосуванні

мультиплікатора. Але, при цьому відповідно знижується і частота струму виробленого генератором. За таких умов пряма передача електроенергії в мережу неможлива, і тому в схемах з тихохідним синхронним генератором виникає необхідність застосування перетворювача частоти для узгодження параметрів виробленої електроенергії з параметрами мережі [40-44]. Один із варіантів схем приєднання до електричної мережі ВЕС на основі тихохідного синхронного генератора наведено на рис. 1.7 г).

Перевагою даного підходу є те, що за рахунок використання перетворювача частоти діапазон потужності, що генерується ВЕС, може бути значно розширений. Недоліком даної схеми є необхідність застосування перетворювача частоти з номінальною потужністю, рівною потужності синхронного генератора, що значно підвищує вартість ВЕС [40-43].

Проте, в комерційних КЕЕС, як правило, застосовують ВЕС малої та середньої потужності.

Тому, зважаючи на суттєві переваги схеми на основі тихохідного синхронного генератора, саме її найдоцільніше застосовувати при створенні КЕЕС, до складу якої входить ВЕС.

1.2.3. Аналітичний огляд існуючих методів та технічних засобів підключення БГЕ до електричної мережі. Одним із ефективних шляхів утилізації біологічних відходів сільськогосподарського виробництва є вироблення з них біогазу. Біогаз – це газ, отриманий в результаті метанового розкладу біомаси під дією різних видів бактерій (гідролізних, кислотоутворюючих, метаноутворюючих). Отриманий таким чином біогаз містить в собі 50 – 87 % метану CH_4 , 13 – 50 % вуглекислого газу CO_2 , незначні домішки водню H_2 та сірководню H_2S . Після очистки біогазу від CO_2 отримується біометан – повний аналог природного газу, який можна використовувати як енергетичний ресурс в БГЕ [45, 46].

Проведений аналітичний огляд показав, що конструкція сучасних БГЕ може суттєво відрізнятись в залежності від їх функціонального призначення [45-47]. Класифікація основних типів БГЕ приведена на рис. 1.8.

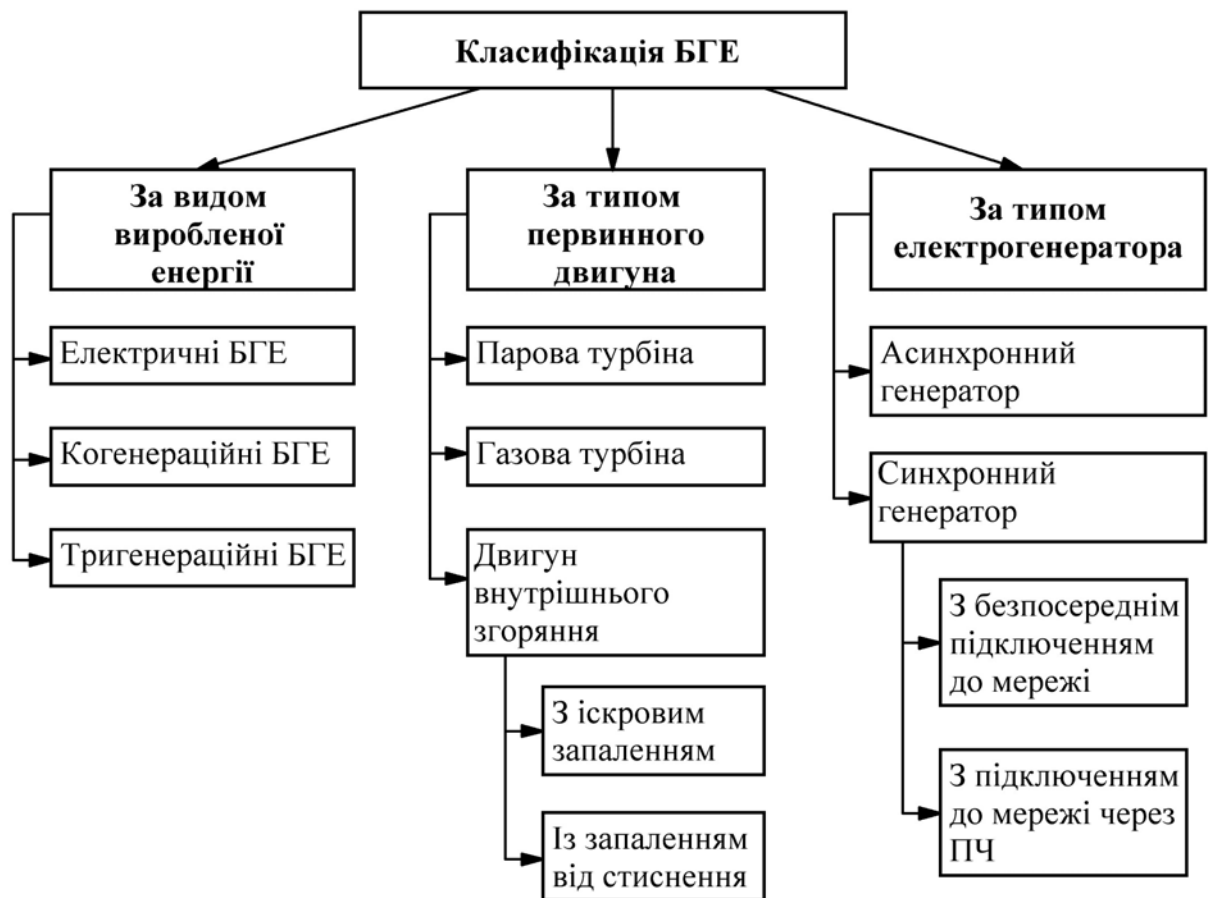


Рис. 1.8. Класифікація біогазових електростанцій

Ефективність процесу виробництва електроенергії в БГЕ, як і в інших типах теплових станцій, не перевищує 40 %. Це пов'язано, в першу чергу, з низьким ККД їх теплового циклу. Тому, БГЕ, що виробляють лише електричну енергію, мають досить низьку ефективність. Зважаючи на необхідність використання теплової енергії в технологічному процесі вироблення біогазу (для підігріву біомаси в ферментаторі) більш досконалим підходом є застосування когенераційних установок в БГЕ.

Сучасна когенераційна установка включає первинний двигун, систему утилізації теплоти, електрогенератор, систему контролю та керування. Дані установки призначені для генерації не лише електроенергії, а і теплової, отриманої за рахунок відбору теплоти від первинного двигуна.

Технології когенерації (або тригенерації) дозволяють підвищити ККД використання біогазу до 90 – 93% [47, 48]. Тому, саме когенераційні установки, як найбільш ефективні, отримали найбільшого поширення в якості перетворювачів хімічної енергії біогазу в електричну та теплову енергію в БГЕ.

Основними типами первинного двигуна, що використовуються в когенераційних установках БГЕ є парова турбіна, газова турбіна та двигун внутрішнього згоряння [48]. Перші два типи первинних двигунів застосовуються в когенераційних установках промислових БГЕ великої потужності (більше 1 МВт). Тому застосування їх в БГЕ, що входять до складу комерційних КЕЕС є недоцільним.

Найбільшого розповсюдження в когенераційних установках БГЕ малої та середньої потужності набули двигуни внутрішнього згоряння [47, 48], в яких відбувається перетворення хімічної енергії біогазу в механічну енергію обертання валу двигуна.

Найбільшого поширення набули двигуни внутрішнього згоряння двох типів: з іскровим запалюванням та з запалюванням від стиснення. Перший тип двигунів в якості палива, окрім біогазу, можуть використовувати бензин або природний газ. Двигуни із запалюванням від стиснення можуть також працювати на дизельному паливі або суміші природного газу з додаванням дизельного палива для запалювання. Дані особливості різних типів двигунів необхідно враховувати в разі використання БГЕ як джерела резервного живлення при обмежених об'ємах запасу біогазу.

Основними перевагами використання двигуна внутрішнього згоряння в когенераційних установках є їх висока продуктивність, порівняно висока ефективність роботи при малому їх завантаженні, низька вартість в порівнянні з іншими типами двигунів, широкий діапазон ряду номінальних потужностей, можливість автономної роботи, швидкий запуск (10 – 20 с), робота з малим тиском газу (менше 1 бар), відносна простота ремонту та обслуговування, можливість роботи на кількох видах палива та ін [47, 48].

Однак двигуни внутрішнього згоряння мають і ряд недоліків, основними з яких є: високий рівень шуму в процесі роботи, високе співвідношення вага/вихідна потужність, обмежена кількість запусків. Останній недолік обов'язково необхідно враховувати при побудові САК БГЕ, що працюють в складі КЕЕС.

Незважаючи на зазначені недоліки, саме двигуни внутрішнього згоряння найдоцільніше застосовувати в когенераційних установках БГЕ, що працюють в складі КЕЕС.

В якості перетворювачів механічної енергії обертання валу первинного двигуна в електричну енергію в БГЕ найбільшого розповсюдження набули асинхронні та синхронні генератори.

Застосування асинхронних генераторів в БГЕ пов'язане з рядом труднощів, які подібні до використання даного типу генераторів в ВЕС: значне споживання реактивної потужності, складність регулювання режимних параметрів електроенергії (рівня напруги, частоти) та ін. Тому використання асинхронних генераторів доцільне лише для БГЕ малої потужності.

В сучасних когенераційних установках БГЕ малої та середньої потужності в якості електрогенераторів найбільшого розповсюдження набули синхронні машини [47, 48]. Перевагами застосування системи «двигун внутрішнього згоряння – синхронний генератор» в БГЕ, що входять до складу КЕЕС, є можливість синхронізації параметрів виробленої електроенергії з параметрами мережі, а також їх здатність регулювання рівня генерації електроенергії в широкому діапазоні. В таких системах стабілізація частоти вихідної напруги здійснюється шляхом стабілізації частоти обертання вала двигуна внутрішнього згоряння, а стабілізація рівня напруги – шляхом зміни струму в обмотці збудження синхронного генератора [49, 50]. При цьому допускається безпосереднє приєднання синхронного генератора на паралельну роботу з мережею.

Як показано в роботі [48] аналіз навантажувальної характеристики двигуна внутрішнього згоряння свідчить, що питома витрата палива досягає абсолютного мінімуму при частковому завантаженні двигуна. Тому в режимі роботи двигуна внутрішнього згоряння що характеризується постійною частотою обертання валу при змінному навантаженні, витрата палива не оптимальна. За рахунок цього знижується ефективність роботи БГЕ в цілому.

Для підвищення ефективності роботи двигуна внутрішнього згоряння в режимі змінного навантаження необхідно здійснювати регулювання частоти обертання валу. Але в результаті цього буде змінюватись і частота вихідної напруги синхронного генератора. Для вирішення даної проблеми необхідно застосовувати приєднання синхронного генератора когенераційної установки до електричної мережі через перетворювач частоти. Схема такого приєднання синхронного генератора до мережі зображена на рис. 1.9.

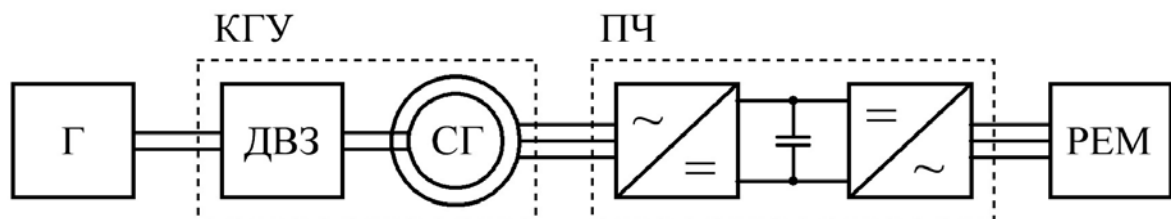


Рис. 1.9. Схема приєднання синхронного генератора когенераційної установки БГЕ до електричної мережі через перетворювач частоти

На рис. 1.9:

Г – газгольдер;

КГУ – когенераційна установка;

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння;

СГ – синхронний генератор;

ПЧ – перетворювач частоти;

РЕМ – розподільна електрична мережа.

В таких системах частота вихідної напруги синхронного генератора стабілізується за допомогою перетворювача частоти. Регулювання рівня генерації електричної потужності БГЕ в мережу здійснюється зміною подачі біогазу в двигун внутрішнього згоряння з допомогою дросель-клапана. Перевагою такої схеми приєднання БГЕ до електричної мережі є її порівняно висока ефективність, а також можливість регулювання рівня генерації електроенергії, що особливо важливо для БГЕ, що працюють в складі КЕЕС.

Таким чином, проведений аналіз методів та технічних засобів підключення установок генерації електроенергії з ВДЕ до електричної мережі показав, що для умов комерційної КЕЕС, до складу якої входять СЕС, ВЕС БГЕ найдоцільніше застосовувати напівпровідникові перетворювачі (інвертори, перетворювачі частоти). Такий підхід дозволяє виконувати гнучке автоматичне керування параметрами генерованої електроенергії, в тому числі і рівнем генерації в досить широких межах, тим самим впливаючи на рівень вихідної напруги в точці приєднання установок з ВДЕ до РЕМ.

Сучасна світова промисловість випускає широкий спектр напівпровідникових перетворювачів для установок з ВДЕ. В залежності від їх призначення та вимог до даних пристроїв, в них можуть бути реалізовані різноманітні алгоритми автоматичного керування. Тому, для досягнення поставленої в роботі мети, необхідно провести аналіз існуючих методів та технічних засобів автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС з метою виявлення їх недоліків.

1.3 Огляд методів та технічних засобів автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

Як зазначалось вище, для умов території України в складі комерційних КЕЕС найдоцільніше застосовувати СЕС, ВЕС, БГЕ. САК такої КЕЕС можна умовно поділити на два рівні (рис. 1.10):

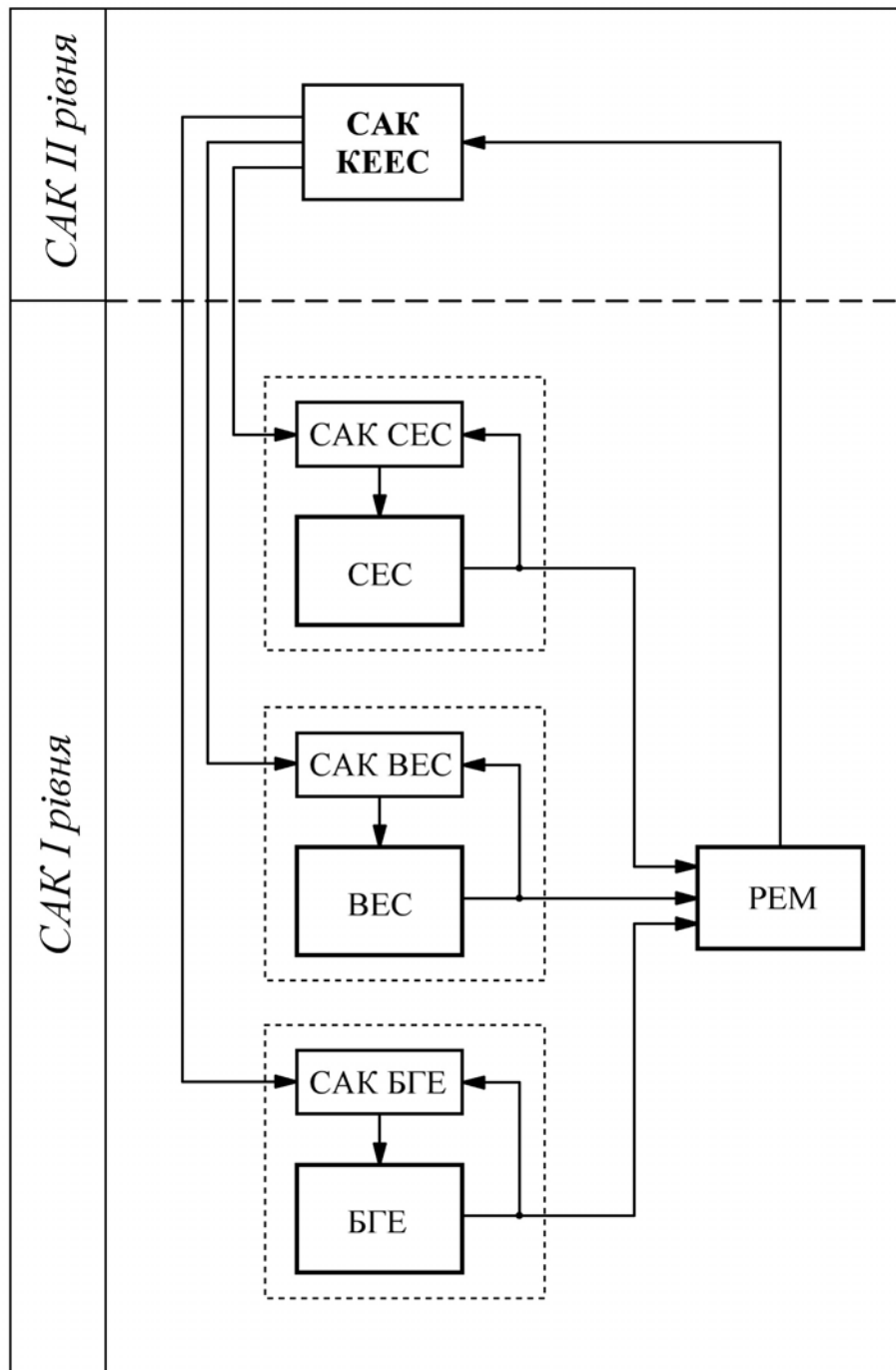


Рис. 1.10. Узагальнена структурна схема дворівневої САК режимом КЕЕС

1. САК I рівня (локальні САК) – це системи, що здійснюють автоматичне керування генерацією активної потужності кожної з установок з ВДЕ окремо з метою забезпечення найбільш ефективної їх роботи в залежності від дії зовнішніх збурень (зміна освітленості сонячних панелей

СЕС, зміна швидкості вітру, зміна тиску біогазу в резервуарі БГЕ та ін.). Локальні САК підпорядковуються центральній САК режимом роботи КЕЕС.

2. САК II рівня (центральна САК) здійснює автоматичне керування параметрами режиму КЕЕС в цілому, за рахунок здійснення керуючих впливів на локальні САК кожної з установок з ВДЕ.

Керуючі впливи центральної САК визначаються в залежності від значень режимних параметрів в РЕМ (рівень напруги, частота мережі, потужність електричного навантаження та ін.) і надходять до локальних САК установок з ВДЕ, тим самим забезпечуючи необхідні значення параметрів режиму КЕЕС в залежності від цілей керування.

Сучасна промисловість виготовляє досить широкий асортимент установок з ВДЕ, в САК яких реалізуються різноманітні алгоритми керування в залежності від типу ВДЕ, призначення установки та ін. Тому, необхідно провести аналітичний огляд існуючих методів та технічних засобів автоматичного керування генерацією активної потужності для кожного із зазначених типів ВДЕ з метою виявлення їх недоліків.

1.3.1. Огляд існуючих методів та технічних засобів автоматизації керування генерацією активної потужності СЕС. Як зазначалось в попередніх параграфах, одним із основних елементів СЕС, що входить до складу КЕЕС, є мережевий інвертор – пристрій, призначений для перетворення постійного струму, що виробляється сонячними батареями в змінний струм промислової частоти. Спрощена принципова схема, яка лежить в основі конструкції більшості сучасних інверторів СЕС, наведена на рис. 1.11.

На рис. 1.11:

СБ – сонячна батарея;

РЕМ – розподільна електрична мережа;

1 – керований перетворювач постійного струму (DC/DC перетворювач), з допомогою якого реалізується функція MPPT-трекінгу;

2 – блок конденсаторів, призначений для зменшення рівня пульсацій напруги на виході з блоку 1;

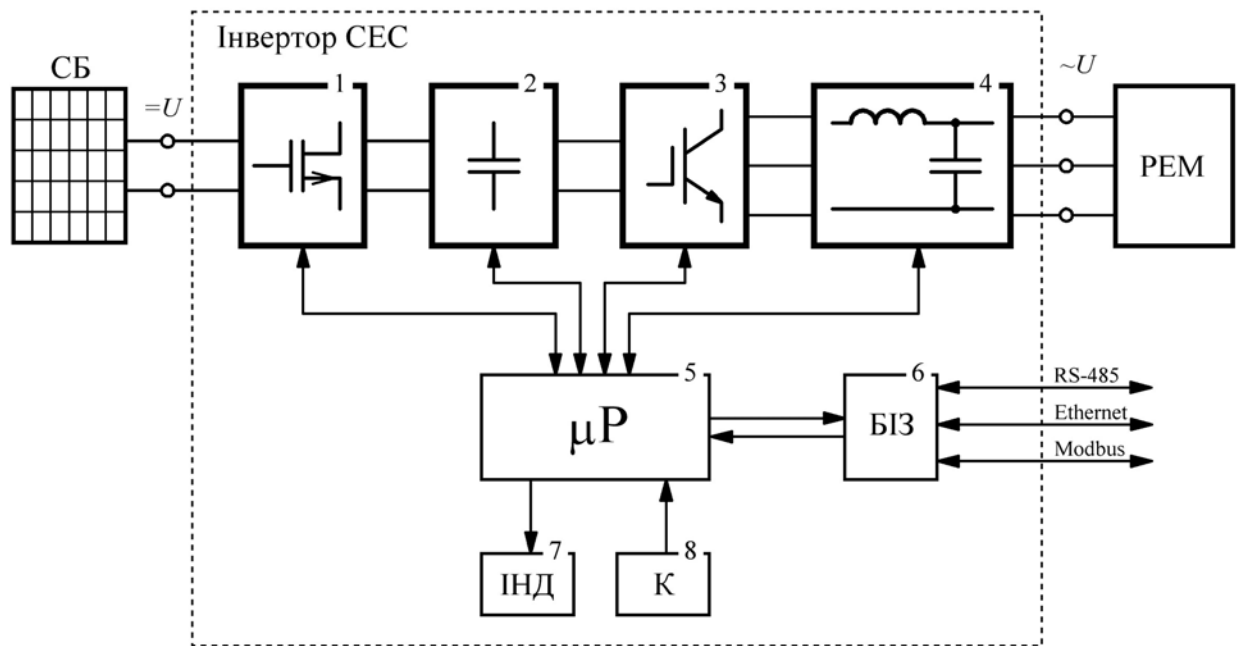


Рис. 1.11. Спрощена принципова схема інвертора СЕС

3 – керований перетворювач постійного струму в змінний;

4 – мережевий фільтр, призначений для зниження рівнів спотворення синусоїдальності форми кривої напруги на виході з блоку 3;

5 – мікропроцесорний пристрій, який реалізує алгоритм роботи САК інвертора;

6 – блок зовнішніх інтерфейсів, призначений для зв'язку інвертора СЕС із зовнішніми пристроями (в тому числі і з центральною САК режимом роботи КЕЕС);

7 – блок індикації;

8 – клавіатура.

Принцип роботи сонячного мережевого інвертора полягає в наступному. Постійний струм, що генерується сонячною батареєю, надходить до керованого перетворювача постійного струму 1, в якому, відбувається його перетворення у відповідності із обраним алгоритмом пошуку точки максимальної потужності (MPPT). Також за допомогою даного

блоку відбувається обмеження рівня генерації електричної потужності, у разі надходження відповідного сигналу керування від мікропроцесорного блоку 5. Для реалізації даної функції найчастіше застосовується метод широтно-імпульсної модуляції (ШІМ): постійний струм на виході керованого випрямляча 1 перетворюється в імпульсний (типу меандр) струм, при цьому вихідна потужність змінюється пропорційно значенню шпаруватості сигналу. В блоці конденсаторів 2, що виконує функції фільтра нижніх частот, відбувається перетворення імпульсного (пульсуючого) струму з виходу перетворювача 1 в постійний струм, який надходить до керованого перетворювача постійного струму в змінний 3. Для отримання на виході змінного струму промислової частоти в керованому перетворювачі 3 застосовується ШІМ синусоїдного сигналу. Мережевий фільтр низьких частот 4 слугує для зниження рівня спотворень синусоїдальності форми кривої напруги та струму на виході з інвертора. Мікропроцесорний блок 5 слугує для технічної реалізації САК режимом роботи інвертора СЕС. Також в даному блоці реалізовані алгоритм MPPT-трекінгу, алгоритм роботи ШІМ та інше. В більшості сучасних мережевих інверторів СЕС реалізована можливість обміну даними із зовнішніми пристроями по стандартним інтерфейсам (RS-485, Ethernet та ін.) шляхом використання стандартних комунікаційних протоколів (наприклад, протоколу Modbus) (блок 6). Це дозволяє здійснювати функції дистанційного керування та вимірювання параметрів СЕС, що, в свою чергу, значно спрощує інтеграцію мережевого інвертора СЕС в центральну САК режимом роботи КЕЕС.

Проведений в роботі аналіз методів та технічних засобів автоматизації керування режимом роботи СЕС [51-70] показав, що в більшості сучасних інверторів СЕС застосовуються САК, які в залежності від характеру зворотного зв'язку можна умовно поділити на 3 групи:

- САК режимом генерації СЕС із зворотним зв'язком по вихідній напрузі;

– САК режимом генерації СЕС із зворотним зв'язком по вихідній напрузі та частоті;

– САК режимом генерації СЕС із зворотним зв'язком по вихідній напрузі, частоті та рівню генерації електричної потужності.

На рис. 1.12 наведено структурну схему САК режимом генерації СЕС із зворотним зв'язком по вихідній напрузі.

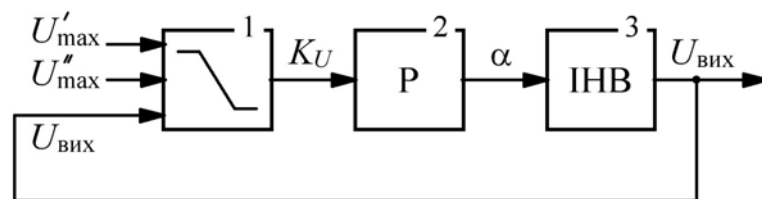


Рис. 1.12. Структурна схема САК режимом генерації СЕС із зворотним зв'язком по вихідній напрузі

На рис. 1.12:

$U'_{\max}$ – значення вихідної напруги, при перевищенні якого відбувається обмеження рівня генерації потужності;

$U''_{\max}$ – значення вихідної напруги, при якому рівень генерації потужності в електричну мережу дорівнює нулю.

$U_{\text{вих}}$ – напруга змінного струму на виході з інвертора (у точці приєднання СЕС до електричної мережі);

K_U – рівень обмеження генерації електричної потужності в залежності від значення вихідної напруги інвертора;

α – значення шпаруватості для алгоритму ШІМ керованого перетворювача постійного струму;

1 – підсилюючий блок з насиченням, з допомогою якого задається характеристика обмеження рівня вихідної потужності в залежності від напруги;

2 – блок перетворення значення обмеження рівня вихідної потужності в значення шпаруватості сигналу;

3 – інвертор СЕС.

Принцип роботи даної САК полягає в наступному. Виміряне значення напруги на виході інвертора $U_{\text{вих}}$ надходить до блоку підсилення 1, відбувається обмеження рівня вихідної потужності у разі перевищення напруги порогового значення U'_{max} . Залежність значення рівня генерації електричної потужності від значення вихідної напруги інвертора СЕС, що задається в блоці 1, наведено на рис. 1.13 у вигляді графіка.

Значення рівня обмеження генерації електричної потужності K_U з виходу блоку 1 потрапляє на вхід блоку 2, в якому відбувається перетворення значення обмеження рівня вихідної потужності K_U в значення шпаруватості сигналу α .

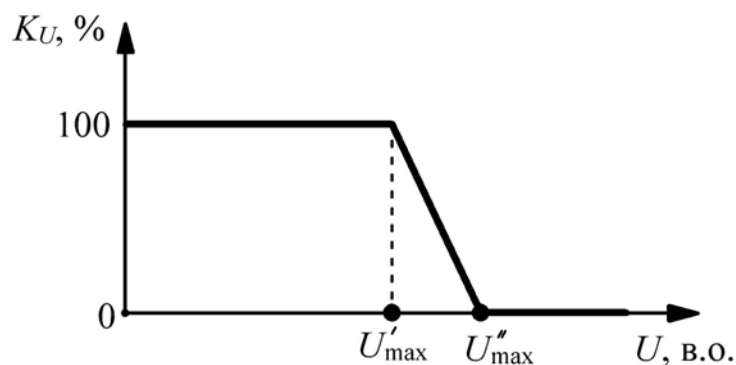


Рис. 1.13. Залежність рівня генерації електричної потужності від значення вихідної напруги інвертора

Такий алгоритм роботи САК режимом генерації СЕС, перш за все, спрямований на уникнення аварійних ситуацій, що виникають при понаднормових значеннях усталеного відхилення вихідної напруги інвертора.

При надлишку генерації активної потужності в електричній мережі (що виникає, в тому числі, і у випадку наявності значної кількості потужних установок з ВДЕ) спостерігається зміна значення частоти напруги мережі у бік її збільшення. Тому в таких РЕМ необхідно передбачити обмеження рівня генерації електричної енергії в залежності від значення частоти вихідної напруги інвертора СЕС. На рис. 1.14 наведено структурну схему такої САК режимом генерації СЕС із зворотним зв'язком по вихідній напрузі та частоті.

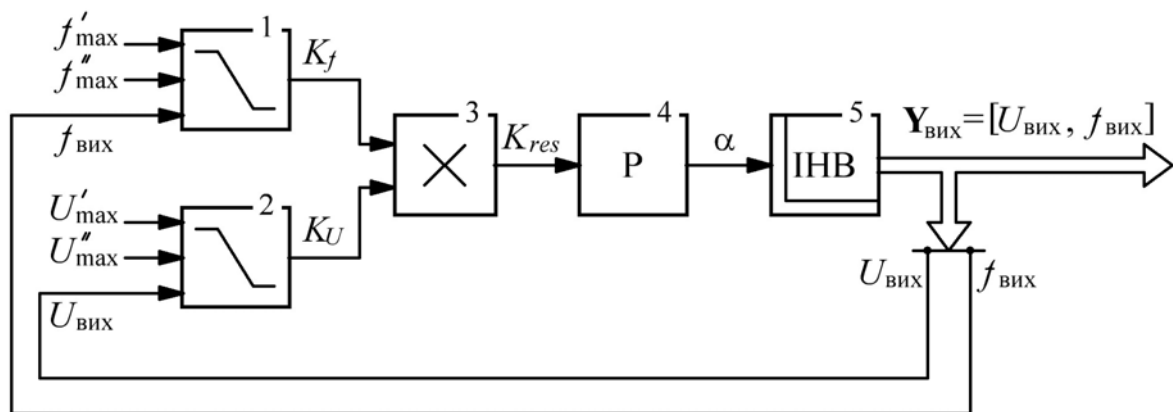


Рис. 1.14. Структурна схема САК режимом СЕС зі зворотним зв'язком по вихідній напрузі та частоті

На рис. 1.14:

$f'_{\max}$ – значення частоти вихідної напруги, при перевищенні якого відбувається обмеження рівня генерації потужності;

$f''_{\max}$ – значення частоти вихідної напруги, при якому рівень генерації потужності в електричну мережу дорівнює нулю.

$f_{\text{вих}}$ – значення частоти напруги змінного струму на виході з інвертора (у точці приєднання СЕС до електричної мережі);

K_f – рівень обмеження генерації електричної потужності в залежності від значення частоти вихідної напруги інвертора;

$K_{res} = K_U K_f$ – результуюче значення рівня обмеження генерації електричної потужності в залежності від значення вихідної напруги та частоти;

α – значення шпаруватості для алгоритму ШІМ керованого перетворювача постійного струму;

1 – підсилюючий блок з насиченням, з допомогою якого задається характеристика обмеження рівня вихідної потужності в залежності від частоти;

2 – підсилюючий блок з насиченням, з допомогою якого задається характеристика обмеження рівня вихідної потужності в залежності від напруги;

3 – блок розрахунку результуючого значення рівня K_{res} обмеження генерації електричної потужності в залежності від значення вихідної напруги та частоти;

4 – блок перетворення значення обмеження рівня вихідної потужності в значення шпаруватості сигналу;

5 – інвертор СЕС.

Залежність значення рівня генерації електричної потужності від значення частоти вихідної напруги інвертора СЕС, що задається в блоці 2, наведено на рис. 1.15 у вигляді графіка.

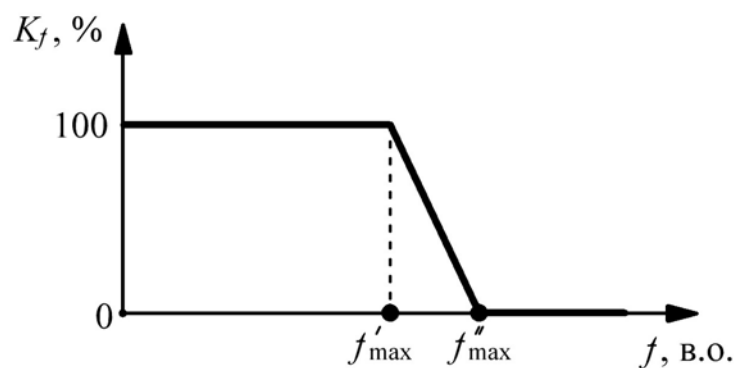


Рис. 1.15. Залежність рівня генерації електричної потужності від значення частоти вихідної напруги інвертора

Загальним недоліком вищеописаних САК режимом генерації СЕС, що суттєво ускладнює їх застосування в КЕЕС, є неможливість безпосереднього керування генерацією активної потужності в мережу.

Даний недолік відсутній в САК зі зворотним по вихідній напрузі, частоті та рівню генерації електричної потужності. Структурна схема такої САК наведена на рис 1.16.

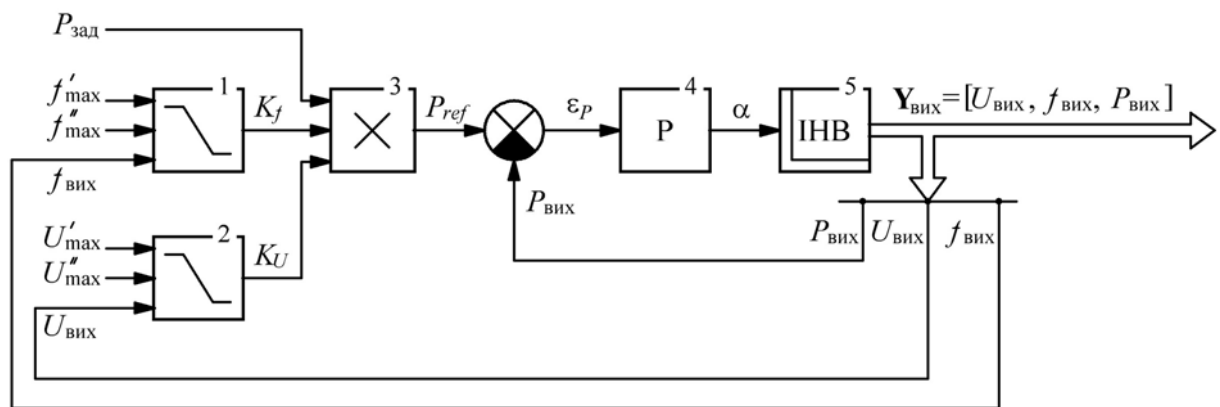


Рис. 1.16. Структурна схема САК режимом генерації СЕС із зворотним зв'язком по вихідній напрузі, частоті та рівню генерації електричної потужності

На рис. 1.16:

$P_{\text{зад}}$ – бажаний рівень генерації електричної потужності в мережу;

P_{ref} – рівень генерації електричної потужності в мережу з урахуванням обмежень по напрузі та частоті;

$\varepsilon_P = P_{\text{ref}} - P_{\text{вих}}$ – величина розузгодження між P_{ref} та $P_{\text{зад}}$;

$P_{\text{вих}}$ – потужність, що генерується в електричну мережу від СЕС.

Зважаючи на переваги САК із зворотним зв'язком по вихідній напрузі $U_{\text{вих}}$, частоті f та рівню генерації електричної потужності P саме такі системи найдоцільніше застосовувати в інверторах СЕС, що працюють в складі КЕЕС.

1.3.2. Огляд існуючих методів та технічних засобів автоматизації керування генерацією активної потужності ВЕС. Як зазначалось вище, при створенні КЕЕС, до складу якої входить ВЕС, найбільш доцільно застосовувати схему приєднання синхронного генератора ВЕС, яка передбачає перетворення частоти вихідної напруги. Дана схема включає в себе керований випрямляч та інвертор. Керований випрямляч призначений не лише для перетворення змінного струму в постійний, але і виконує функції регулювання параметрів електрогенератора ВЕС та захисту його від перенапруг.

Спрощена принципова схема керованого випрямляча ВЕС наведена на рис. 1.17.

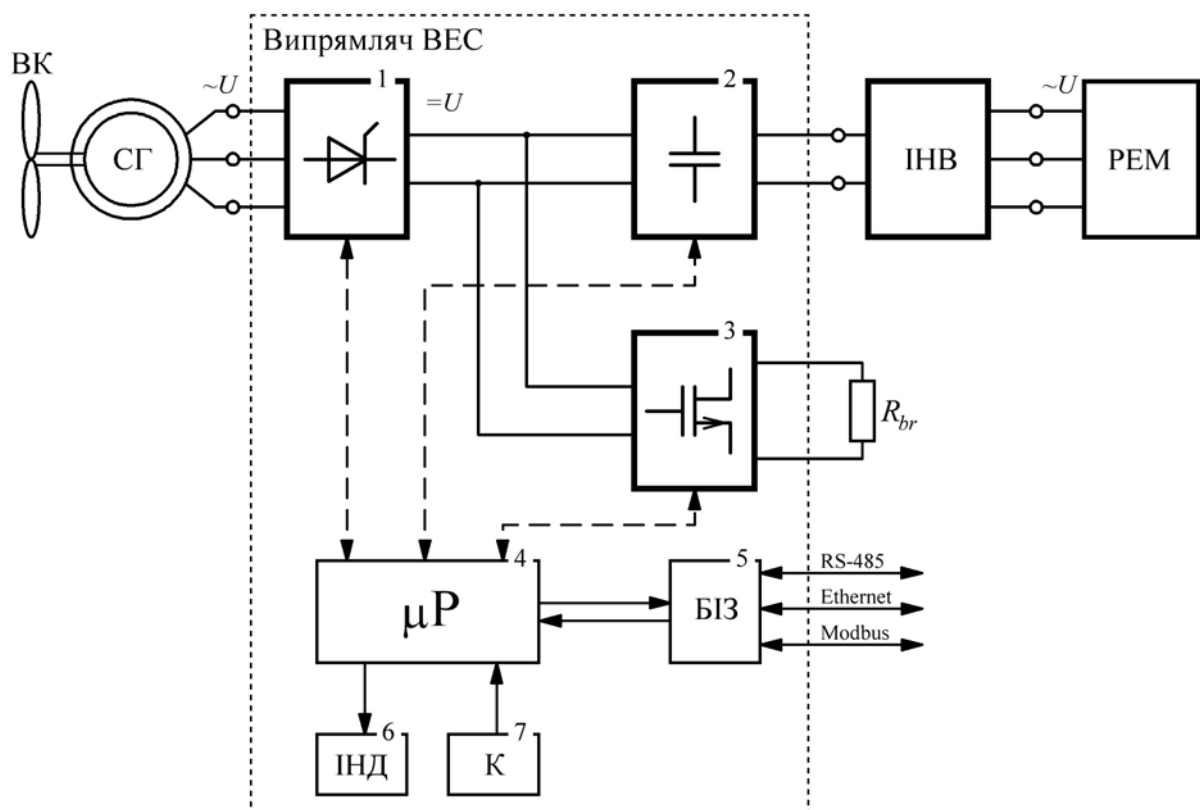


Рис. 1.17. Спрощена схема керованого випрямляча ВЕС

На рис. 1.17:

ВК – вітроколесо ВЕС;

СГ – синхронний генератор ВЕС;

ІНВ – мережевий інвертор;

РЕМ – розподільна електрична мережа;

R_{br} – навантажувальний резистор ВЕС, що вмикається паралельно навантаженню (інвертору ВЕС);

1 – блок перетворення змінного струму в постійний;

2 – фільтр нижніх частот, призначений для зменшення рівня пульсацій напруги на виході з блоку 1;

3 – блок керованих напівпровідникових ключів (IGBT транзисторів);

4 – мікропроцесорний пристрій, в якому реалізована САК випрямляча;

5 – блок зовнішніх інтерфейсів;

6 – блок індикації;

7 – клавіатура.

В залежності від алгоритму, покладеного в основу роботи САК генерацією активної потужності ВЕС додатковий навантажувальний резистор R_{br} може виконувати такі функції:

- обмеження (регулювання) потужності, що генерується ВЕС в мережу (через ланцюг інвертора);

- захисту інвертора ВЕС від перенапруги по стороні постійної напруги.

Аналіз існуючих САК керованого випрямляча ВЕС показав, що їх умовно можна поділити на дві групи [52-57]:

- САК генерацією активної потужності ВЕС із зворотним зв'язком по напрузі постійного струму;

- САК генерацією активної потужності ВЕС із зворотним зв'язком по напрузі постійного струму та рівню генерації електричної потужності.

Структурна схема САК генерацією активної потужності ВЕС із зворотним зв'язком по напрузі постійного струму наведена на рис. 1.18.

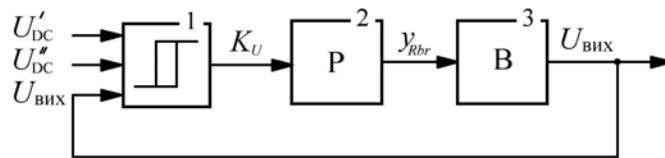


Рис. 1.18. Структурна схема САК генерацією активної потужності ВЕС із зворотним зв'язком по напрузі постійного струму

На рис. 1.18:

1 – пороговий блок з зоною нечутливості;

U'_{DC} – верхня межа зони нечутливості порогового блоку 1;

U''_{DC} – нижня межа зони нечутливості порогового блоку 1;

2 – блок перетворення значення обмеження рівня вихідної потужності K_U в сигнал керування керованого випрямляча В;

3 – керований випрямляч ВЕС.

САК генерацією активної потужності ВЕС із зворотним зв'язком по напрузі постійного струму працює наступним чином. Виміряне значення вихідної напруги випрямляча U_{DC} надходить до порогового блоку 1. В даному блоці відбувається порівняння виміряного значення U_{DC} зі значеннями U'_{DC} та U''_{DC} , в результаті якого формується вихідний сигнал K_U . В залежності від значення K_U блок перетворення 2 формує команду на ввімкнення або вимкнення навантажувального резистора R_{br} , тим самим обмежуючи значення вихідної напруги U_{DC} .

Описана САК реалізує функцію захисту інвертора ВЕС від перенапруг. Недоліком даної САК генерацією активної потужності ВЕС, що ускладнює їх застосування в КЕЕС, є неможливість безпосереднього керування рівнем генерації електричної потужності в мережу.

На рис. 1.19 наведена структурна схема САК генерацією активної потужності ВЕС із зворотним зв'язком по напрузі постійного струму та рівню генерації електричної потужності

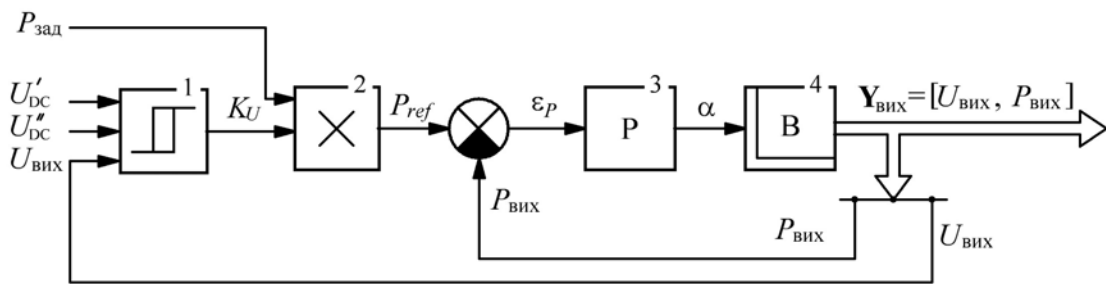


Рис. 1.19. Структурна схема САК генерацією активної потужності ВЕС із зворотним зв'язком по напрузі постійного струму та рівню генерації електричної потужності

Контур регулювання потужності в даній САК реалізується аналогічно схемі керування генерацією активної потужності СЕС, що зображена на рис. 1.16. При цьому можливе плавне регулювання вихідної потужності за рахунок широтно-імпульсної модуляції струму навантажувального резистора R_{br} з допомогою блоку керованих напівпровідникових ключів (блок 3 на рис. 1.17).

Зважаючи на це, саме таку САК із зворотним зв'язком по напрузі постійного струму та рівню генерації електричної потужності найдоцільніше застосовувати в керованих випрямлячах ВЕС, що працюють в складі КЕЕС.

1.3.3. Огляд існуючих методів та технічних засобів автоматизації керування генерацією активної потужності БГЕ. Проведений аналіз методів автоматизації керування генерацією активної потужності БГЕ показав, що більшість сучасних КГУ, які входять до складу БГЕ, оснащені САК, які дозволяють безпосередньо здійснювати регулювання рівня потужності генерації за рахунок зміни витрати біогазу в двигунах внутрішнього згоряння [67-70]. Структурна схема найбільш поширеної САК генерацією активної потужності БГЕ зі зворотним зв'язком по рівню генерації електричної потужності приведена на рис. 1.20

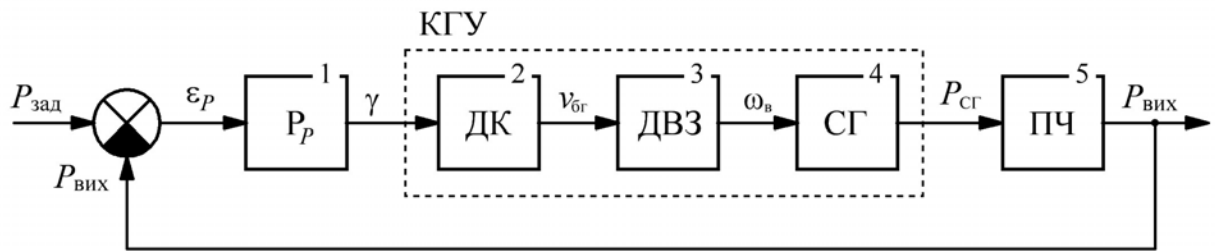


Рис. 1.20. Структурна схема САК генерацією активної потужності БГЕ зі зворотним зв'язком по рівню генерації електричної потужності

На рис. 1.20:

P_P – регулятор рівня генерації електричної потужності БГЕ;

КГУ – когенераційна установка;

ДК – дросель-клапан, з допомогою якого регулюється подача біогазу;

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння;

СГ – синхронний генератор;

ПЧ – перетворювач частоти;

$P_{\text{зад}}$ – заданий рівень генерації електричної потужності БГЕ;

$P_{\text{вих}}$ – дійсний рівень генерації електричної потужності БГЕ;

$\varepsilon_P = P_{\text{зад}} - P_{\text{вих}}$ – величина розузгодження між $P_{\text{зад}}$ та $P_{\text{вих}}$;

γ – кут повороту заслінки дросель-клапана;

$v_{\text{бг}}$ – питома витрата біогазу;

$\omega_{\text{в}}$ – кутова швидкість обертання валу СГ;

$P_{\text{СГ}}$ – електрична потужність СГ.

САК, структурна схема якої зображена на рис. 1.20, працює наступним чином. Виміряне значення вихідної потужності $P_{\text{вих}}$, що генерується БГЕ, порівнюється із заданим значенням потужності генерації $P_{\text{зад}}$. У разі появи розузгодження ε_P його значення потрапляє на вхід регулятора P_P рівня генерації електричної потужності БГЕ. Регулятор, згідно закладеного закону керування (наприклад пропорційно-інтегрально-диференційного закону), визначає величину кута повороту γ заслінки дросель-клапана ДК. В

результаті зміни кута повороту заслінки змінюється питома витрата біогазу v_{bg} , і, як наслідок, змінюється кутова швидкість обертання валу СГ, який з'єднаний з валом ДВЗ. Це призводить до зміни рівня генерації потужності синхронним генератором, яка, надходячи на вхід перетворювача частоти ПЧ (який слугує для синхронізації частоти та рівня напруги між СГ та електричною мережею), передається до електричної мережі.

Слід зазначити, що за наявності кількох КГУ в складі БГЕ дискретне керування рівнем потужності генерації можливо здійснювати вимиканням деяких з них. При цьому САК такої БГЕ для забезпечення найбільш ефективного її використання повинна враховувати номінальну потужність кожної з КГУ, параметри ДВЗ кожної з них та ін. Зазвичай дану функцію виконує центральна САК режимом роботи КЕЕС.

1.3.4. Аналітичний огляд існуючих методів та технічних засобів централізованого автоматичного керування режимом роботи КЕЕС. Як було зазначено вище, САК режимом роботи КЕЕС є дворівневою, і складається із САК локального рівня та централізованої САК режимом генерації КЕЕС.

На рис. 1.21 наведено функціональну схему централізованої КЕЕС.

На рис. 1.21:

СЕС – сонячна електростанція;

СБ – сонячні батареї;

ІНВ СЕС – інвертор сонячної електростанції;

САК СЕС – локальна система автоматичного керування режимом роботи сонячної електростанції;

ВЕС – вітрова електростанція;

ВЕУ – вітрова електрична установка;

КВ ВЕС – керований випрямляч вітроелектростанції;

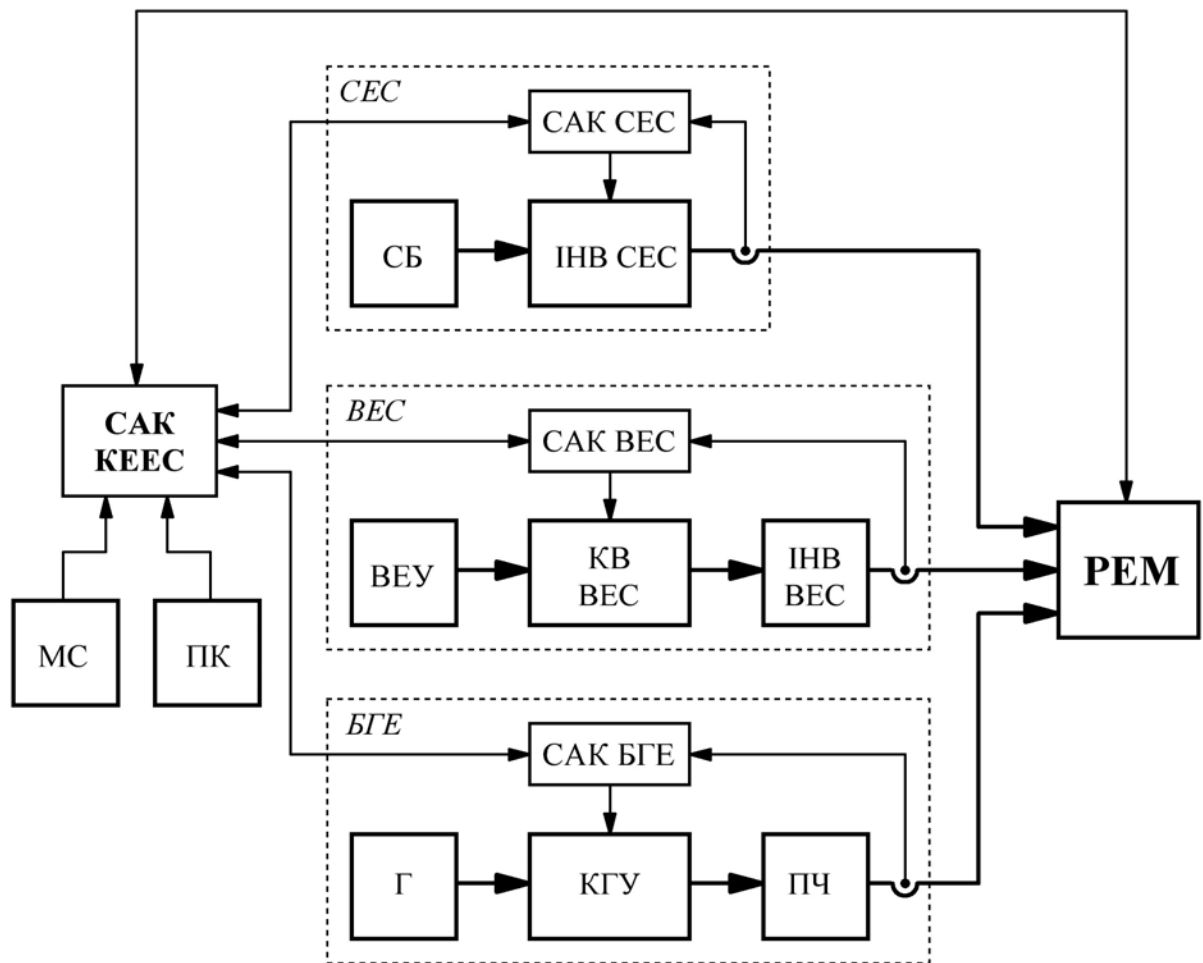


Рис. 1.21. Функціональна схема централізованої САК КЕЕС

ІНВ ВЕС – інвертор вітроелектростанції;

САК ВЕС – локальна система автоматичного керування режимом роботи вітрової електростанції;

БГЕ – біогазова електростанція;

Г – газгольдер;

КГУ – когенераційна установка;

ПЧ – перетворювач частоти;

САК БГЕ – локальна система автоматичного керування режимом роботи біогазової електростанції;

РЕМ – районна електрична мережа;

САК КЕЕС – система автоматичного керування режимом роботи комбінованої електроенергетичної системи;

МС – метеостанція;

ПК – персональний комп'ютер, призначений для конфігурації параметрів та налаштувань.

Як видно з рис. 1.21, на входи централізованої САК КЕЕС надходить інформація від локальних САК установок з ВДЕ, інформація про поточні параметри режиму РЕМ та ін. В залежності від значень даних параметрів централізована САК КЕЕС згідно заданого алгоритму передає керуючі впливи локальним САК, тим самим впливаючи на режим роботи РЕМ в цілому.

Важливим аспектом ефективного використання енергії ВДЕ є наявність інформації про їх можливий максимальний поточний рівень генерації електричної потужності.

Задача визначення максимального рівня генерації потужності БГЕ є відносно простою і полягає у визначенні наявної кількості біогазу в газгольдері шляхом аналізу інформації від датчика тиску біогазу.

Більш складною видається оцінка наявної максимальної потужності для СЕС та ВЕС. Як відомо на СЕС та ВЕС виробництво електричної енергії залежить в першу чергу від інтенсивності сонячного випромінювання та швидкості вітру. З метою оцінки правильності роботи електростанцій відбувається контроль та фіксація поточних метеоданих, на основі яких здійснюється контроль роботи електростанцій, прогнозування виробітку електричної енергії, керування режимом роботи тощо.

Вимірювання метеорологічних даних, що використовуються для розрахунку потужності СЕС та ВЕС, зручно проводити з допомогою спеціальних приладів – метеостанцій.

На рис. 1.22 приведений зовнішній вигляд однієї з таких метеостанцій, виробництва компанії WeatherHawk [71].



Рис. 1.22. Зовнішній вигляд метеостанції виробництва компанії WeatherHawk

Такі метеостанції дають можливість отримувати дані про температуру і тиск повітря, напрямок і швидкість вітру, інтенсивність сонячного випромінювання тощо. Інформація про зазначені виміряні параметри від метеостанції через стандартні цифрові інтерфейси надходить до централізованої САК режимом генерації КЕЕС, в якій відбувається визначення відповідної максимальної вихідної електричної потужності СЕС та ВЕС.

Аналіз існуючих САК режимом генерації КЕЕС з ВДЕ показав [51-70], що в більшості з них враховується вплив рівня генерації електричної потужності на параметри якості електроенергії в точці приєднання. Зокрема, для уникнення понаднормових значень відхилень напруги, таке обмеження генерації електричної потужності в мережу відбувається за рахунок встановлення фіксованого значення максимально допустимого рівня напруги. Як правило таке обмеження встановлюється на рівні нормально допустимого значення $+5\%$, що, в свою чергу, забезпечує значення інтегральної ймовірності потрапляння в нормально допустимі межі для відхилення напруги близьким до 1.

Проте, такий підхід призводить до неповного використання наявної потужності генерації ВДЕ, і, як наслідок, до зменшення прибутку від генерації електричної енергії в мережу по «зеленому» тарифу.

Більш перспективним видається підхід до побудови САК режимом генерації КЕЕС, за якого уставка обмеження потужності генерації установками з ВДЕ розраховується в режимі реального часу з урахуванням поточного значення збитків від понаднормових значень відхилення напруги [8, 9, 72, 80, 81]. Зважаючи на це виникає необхідність у проведенні подальших досліджень з питання автоматизації керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

1.4 Постановка та етапи розв'язання задачі автоматизації керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

Для вирішення задачі автоматизації керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС необхідні додаткові дослідження по наступним питанням:

1. Провести вибір методу розв'язку задачі автоматизації керування генерацією активної потужності найбільш розповсюджених установок з ВДЕ в КЕЕС.
2. Розробити структурну схему САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС та алгоритм визначення вектору керування.
3. Розробити комп'ютерну імітаційну модель САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.
4. Провести аналіз ефекту від застосування розв'язку задачі автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.
5. Здійснити технічну реалізацію розробленої в роботі САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.
6. Провести техніко-економічну оцінку ефективності використання розробленої в роботі САК.

Задачу автоматизації керування рівнем генерації активної потужності ВДЕ в КЕЕС доцільно розв'язувати в декілька етапів, що наведені на рис. 1.23.

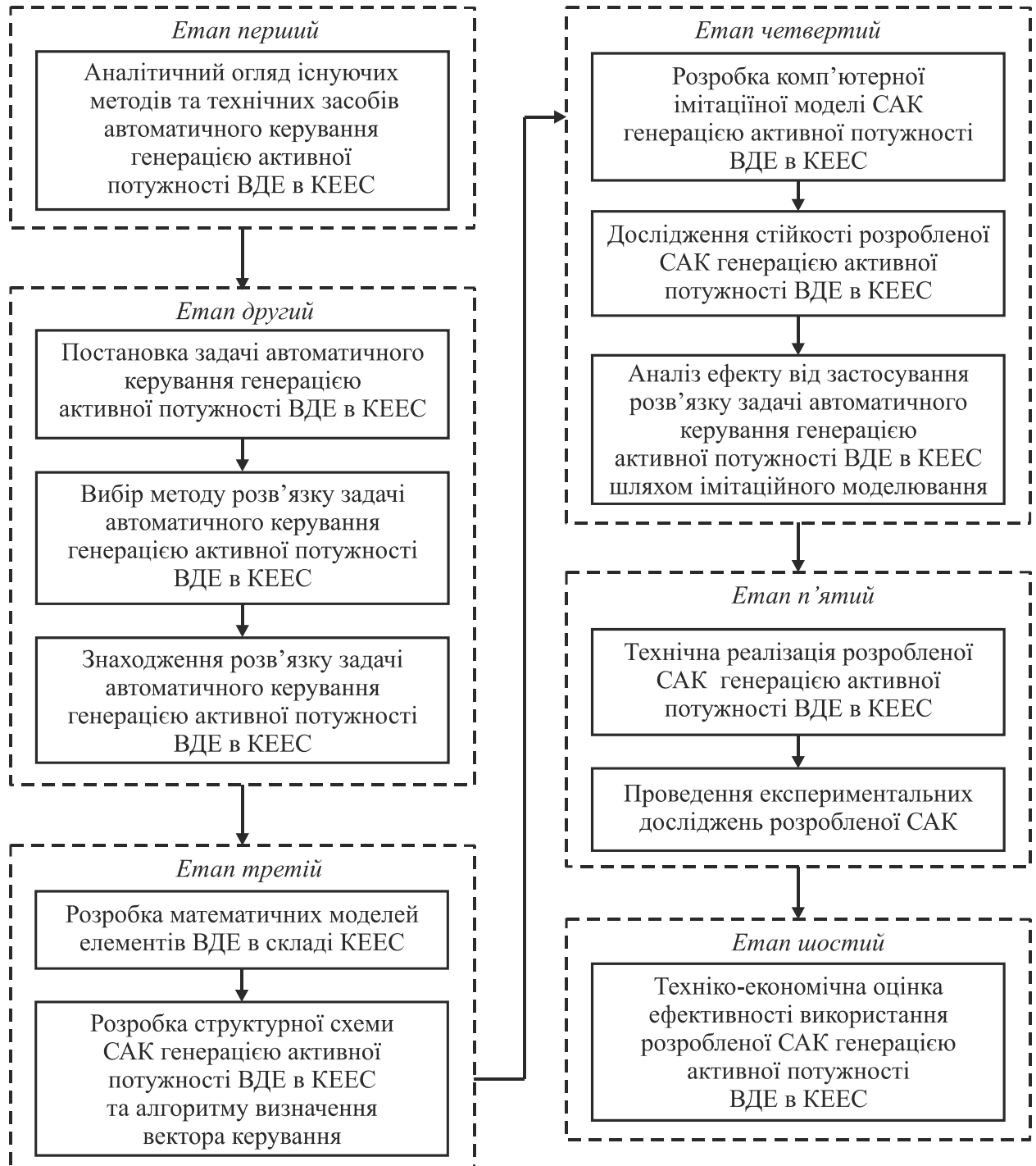


Рис. 1.23. Етапи вирішення задачі автоматизації керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

1.5 Загальна методика досліджень

Вибір напрямку досліджень та визначення етапів розв'язання задачі автоматизації керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС було здійснено в попередньому підрозділі роботи. Засоби та методи, що будуть застосовуватись при вирішенні поставленої задачі досліджень на кожному з етапів, передбачаються загальною методикою досліджень.

Вирішення поставлених в роботі задач дослідження проводилось в 6 етапів, що описані нижче. Кожен з етапів передбачає свої методи досліджень.

Перший етап. На першому етапі проведений аналітичний огляд існуючих методів та технічних засобів автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

На даному етапі використовуються теоретичні методи досліджень, зокрема методи систематизації та наукового узагальнення.

Другий етап. На другому етапі після огляду існуючих методів автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС та виявлення їх недоліків проводиться постановка задачі автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС, вибір методу її розв'язку та знаходження розв'язку. На цьому ж етапі визначається об'єкт керування, його вхідні та вихідні параметри з використанням методів теоретичних досліджень.

Третій етап. На третьому етапі необхідно розробити математичні моделі елементів КЕЕС, до складу якої входять ВДЕ, а також структурну схему САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС на основі отриманих розв'язків задачі автоматизації. Для цього зазвичай використовують методи синтезу структурних схем САК, метод передаточних

функцій, метод аналітичних виразів.

Четвертий етап. На даному етапі на основі розробленої структурної схеми САК необхідно створити комп'ютерну імітаційну модель САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС, та провести з її допомогою комп'ютерне імітаційне моделювання. Це дозволить провести аналіз ефекту від застосування розробленої САК. Для проведення моделювання застосовуються методи комп'ютерного імітаційного моделювання, чисельні методи розв'язку задач.

П'ятий етап. На п'ятому етапі необхідно провести розробку мікропроцесорної САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС, розробити функціональну та принципову схему САК. При проведенні розробки цих схем використовуються засоби обчислювальної техніки, мікросхемотехніки, промислової електроніки.

З метою визначення працездатності розробленої САК проводяться її експериментальні дослідження з використанням методів планування експерименту.

Шостий етап. Техніко-економічна оцінка ефективності розробленої САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС дозволить визначити економічний ефект від автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в розподільну електричну мережу при забезпеченні нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги на затискачах електроспоживачів.

Висновки до розділу

1. В результаті проведеного аналізу питання використання ВДЕ в умовах території України було встановлено, що найбільш доцільним є використання сонячної, вітрової енергії та енергії біогазу. При цьому сумісне використання зазначених ВДЕ в складі КЕЕС для комерційного використання, яка працює паралельно з електричною мережею, дозволяє знизити негативний вплив від нерівномірності потоків первинних енергетичних ресурсів ВДЕ.

2. Аналіз особливостей застосування установок з ВДЕ, що входять до складу КЕЕС, показав, що в режимі генерації електричної потужності вони можуть чинити негативний вплив на якість електроенергії в РЕМ, зокрема призводити до понаднормового підвищення рівня усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів.

3. В результаті аналізу існуючих методів та технічних засобів приєднання установок з ВДЕ до електричної мережі, а також засобів їх автоматизації встановлено, що одним із найпоширеніших підходів до вирішення проблеми понаднормового підвищення рівня усталеного відхилення напруги в режимі генерації КЕЕС є обмеження рівня генерації електричної потужності в мережу з допомогою напівпровідникових пристроїв (інверторів СЕС, керованих випрямлячів ВЕС).

4. Аналіз існуючих САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС показав, що в більшості з них обмеження генерації електричної потужності в мережу відбувається за рахунок встановлення фіксованого значення максимально допустимого рівня напруги. Суттєвим недоліком такого підходу є те, що він призводить до неповного використання наявної потужності генерації ВДЕ, і, як наслідок, до зменшення прибутку від генерації електричної енергії в мережу по «зеленому» тарифу.

5. Обраний напрямок подальших досліджень. Запропоновано розв'язувати задачу автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС в шість етапів, кожен з яких відповідно до загальної методики досліджень передбачає використання своїх засобів та методів.

6. Визначено основні етапи реалізації задачі автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС, показано взаємозв'язок між етапами та послідовність виконання.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГЕНЕРАЦІЄЮ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В КОМБІНОВАНІЙ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ

Комбінована електроенергетична система з відновлюваними джерелами енергії включає ряд джерел електричної енергії, які працюють сумісно. Режим роботи такої системи визначається з однієї сторони поточною потребою в електроенергії, а з іншої сторони – спроможністю джерел постачати енергію [72-86]. Здійснюючи керування генерацією окремих джерел відновлюваної енергії, які входять до складу КЕЕС, можливо керувати режимом її роботи, впливаючи як на загальну вартість спожитої енергії так і на показники якості електроенергії (ПЯЕ).

Для забезпечення такого автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС, при якому б підтримувалася максимальна економічність режимів енергопостачання і одночасно досягалося зниження рівнів усталеного відхилення напруги в РЕМ необхідно вирішити наступні завдання:

- провести постановку задачі автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС;
- провести вибір та обґрунтування методу розв’язання задачі автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС;
- знайти розв’язки задачі автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

Вирішенню описаних завдань і присвячений даний розділ роботи.

2.1 Постановка задачі автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

Як зазначалось вище, одним із шляхів підвищення ефективності роботи КЕЕС з ВДЕ, а саме збільшення рівня генерації потужності від ВДЕ при несуттєвому погіршенні якості електроенергії є удосконалення їх САК.

На рис. 2.1 зображена типова схема РЕМ, до якої підключені установки з ВДЕ, що зустрічається в агропромисловому комплексі.

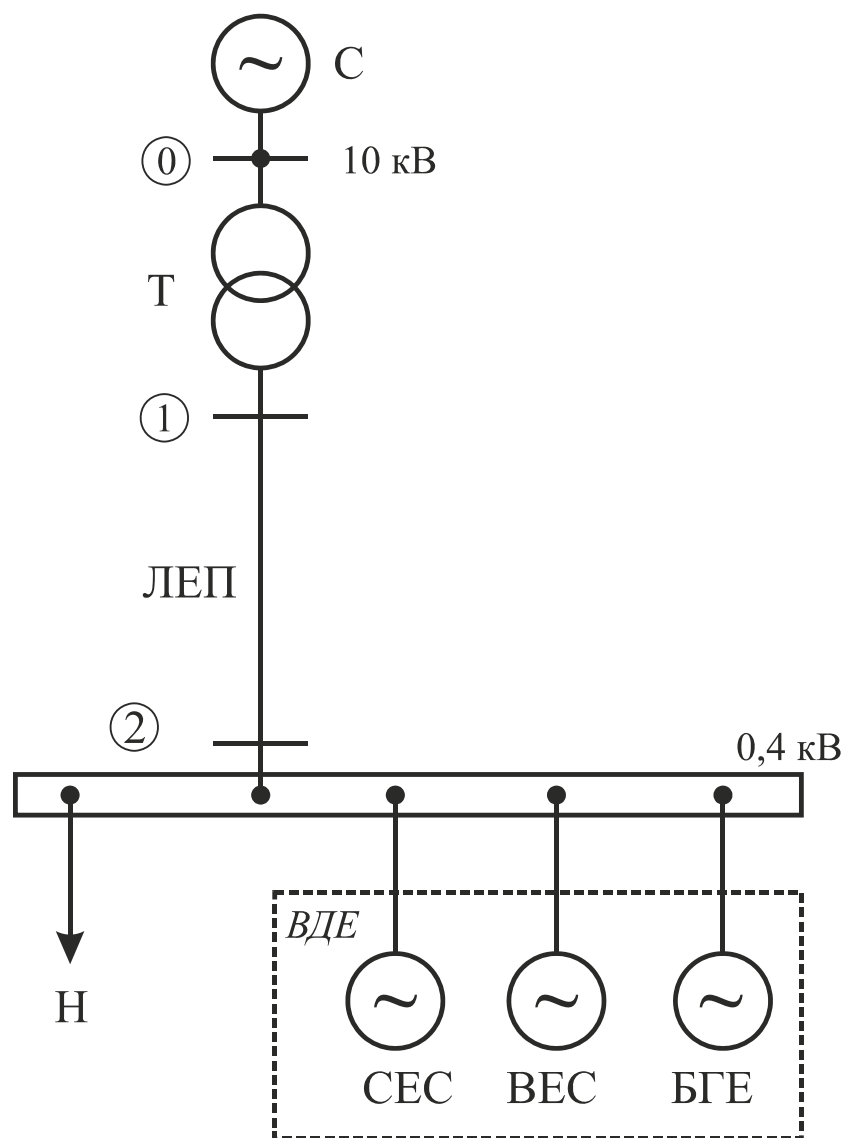


Рис. 2.1. Типова схема РЕМ з ВДЕ агропромислового комплексу

На рис. 2.1:

С – районна електрична мережа;

Т – силовий трансформатор номінальною напругою 10/0,4 кВ;

ЛЕП – лінія електропередачі (кабельна або повітряна);

Н – електричне навантаження електроспоживачів;

СЕС – сонячна електростанція;

ВЕС – вітрова електростанція;

БГЕ – біогазова електростанція.

У вузлі (0) підключення знижувального трансформатора Т до районної електричної мережі підтримується відносно стабільна напруга $U_0 \approx U_{\text{ном}}$ за умови достатньої пропускної здатності елементів електричних мереж та застосування зустрічного регулювання напруги в РЕМ.

У вузлах (1) та (2), за умови відсутності автоматичного регулювання напруги (за винятком наявності керованих джерел реактивної потужності на шинах споживачів) добовий режим напруги буде повністю визначатися режимом потужності у вузлі (2).

В залежності від поточного співвідношення між потужностями споживачів електричної енергії $P_{\text{сп}}$ та потужністю генерації відновлюваними джерелами енергії $P_{\text{ген}} = P_{\text{СЕС}} + P_{\text{ВЕС}} + P_{\text{БГЕ}}$ можна виділити два режими роботи:

1. *Режим споживання електричної енергії від електричної мережі.* За умови перевищення потужності навантаження над потужністю генерації ВДЕ ($P_{\text{сп}} > P_{\text{ген}}$) від вузла 1 до вузла 2 відбувається перетік потужності – $(P_{\text{ген}} - P_{\text{сп}}) < 0$. Це переважний режим роботи, на який проектувалися РЕМ. В цьому режимі понаднормові значення усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів до РЕМ (вузол 2) обумовлюються лише рівнем напруги живлячої мережі (вузли 0, 1).

2. *Режим генерації електричної енергії в електричну мережу.* За умови, коли потужність генерації установками з ВДЕ перевищує потужність електроспоживачів ($P_{\text{ген}} > P_{\text{сп}}$), спостерігається реверсивний потік потужності

в мережу від вузла 2 до вузла 1 ($P_{\text{ген}} - P_{\text{сп}} > 0$). У такому випадку завищені значення усталеного відхилення напруги можуть спричинятись не лише рівнем напруги живлячої мережі (вузли 0, 1), а й генерацією активної потужності від ВДЕ в мережу (вузол 2 на рис. 2.1). Очевидно, що зі збільшенням генерованої потужності $P_{\text{ген}}$ від установок з ВДЕ у РЕМ (від вузла 2 до вузла 1) зростатиме і відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів.

Для одночасного забезпечення зниження рівня усталеного відхилення напруги на шинах споживачів та максимально ефективного використання наявної потужності ВДЕ необхідно здійснювати автоматичне керування рівнем генерації активної потужності кожної з установок з ВДЕ. З метою врахування такого впливу задачу керування установками генерації електричної потужності, що містять ВДЕ, найдоцільніше інтерпретувати як задачу багатокритеріальної оптимізації [72, 80, 81]. Постановка такої задачі має наступний вигляд:

$$\begin{cases} Q_1(P_{\text{ген}}) = -\Pi(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ Q_2(P_{\text{ген}}) = \Delta U(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\min} \dots P_{\max}], \end{cases} \quad (2.1)$$

де Q_1, Q_2 – критерії оптимізації;

$P_{\text{ген}}$ – потужність, яка генерується установками ВДЕ в електромережу;

$[P_{\min} \dots P_{\max}]$ – область допустимих значень $P_{\text{ген}}$;

$\Pi(P_{\text{ген}})$ – дохід від генерації потужності установками з ВДЕ за ставкою «зеленого» тарифу:

$$\Pi(P_{\text{ген}}) = c_0^{\text{ВДЕ}} P_{\text{ген}}, \quad (2.2)$$

де $c_0^{\text{ВДЕ}}$ – середнє арифметичне зважене по потужності генерації установками з ВДЕ значення ставки «зеленого» тарифу:

$$c_0^{\text{ВДЕ}} = \frac{c_0^{\text{СЕС}} P_{\text{ген}}^{\text{СЕС}} + c_0^{\text{ВЕС}} P_{\text{ген}}^{\text{ВЕС}} + c_0^{\text{БГЕ}} P_{\text{ген}}^{\text{БГЕ}}}{P_{\text{ген}}^{\text{СЕС}} + P_{\text{ген}}^{\text{ВЕС}} + P_{\text{ген}}^{\text{БГЕ}}}, \quad (2.3)$$

де $P_{\text{ген}}^{\text{СЕС}}$, $P_{\text{ген}}^{\text{ВЕС}}$, $P_{\text{ген}}^{\text{БГЕ}}$ – потужність генерації СЕС, ВЕС, БГЕ відповідно.

$c_0^{\text{СЕС}}$, $c_0^{\text{ВЕС}}$, $c_0^{\text{БГЕ}}$ – ставки «зеленого» тарифу для електроенергії, що генерується СЕС, ВЕС та БГЕ відповідно;

$3_{\Delta U}(P_{\text{ген}})$ – економічні збитки від понаднормових значень усталеного відхилення напруги на затискачах електроспоживачів:

$$3_{\Delta U}(P_{\text{ген}}) = a_1 [\Delta U(P_{\text{ген}}) + a_2]^2 \frac{S_{\text{н}}}{S_{\text{н max}}}, \quad (2.4)$$

де $\Delta U(P_{\text{ген}})$ – значення усталеного відхилення напруги на затискачах електроспоживачів;

a_1 , a_2 – постійні коефіцієнти, що визначаються якісним складом електроспоживачів;

$S_{\text{н}}$ – поточне значення повної потужності навантаження;

$S_{\text{н max}}$ – максимальне значення повної потужності навантаження.

На рис. 2.2 приведена узагальнена структурна схема САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС, що базується на розв'язках задачі керування (2.1).

На рис. 2.2:

КЕЕС – комбінована електроенергетична система;

ОК – об'єкт керування;

Р – регулятор, що визначає вектор керування базуючись на розв'язках задачі керування (2.1);

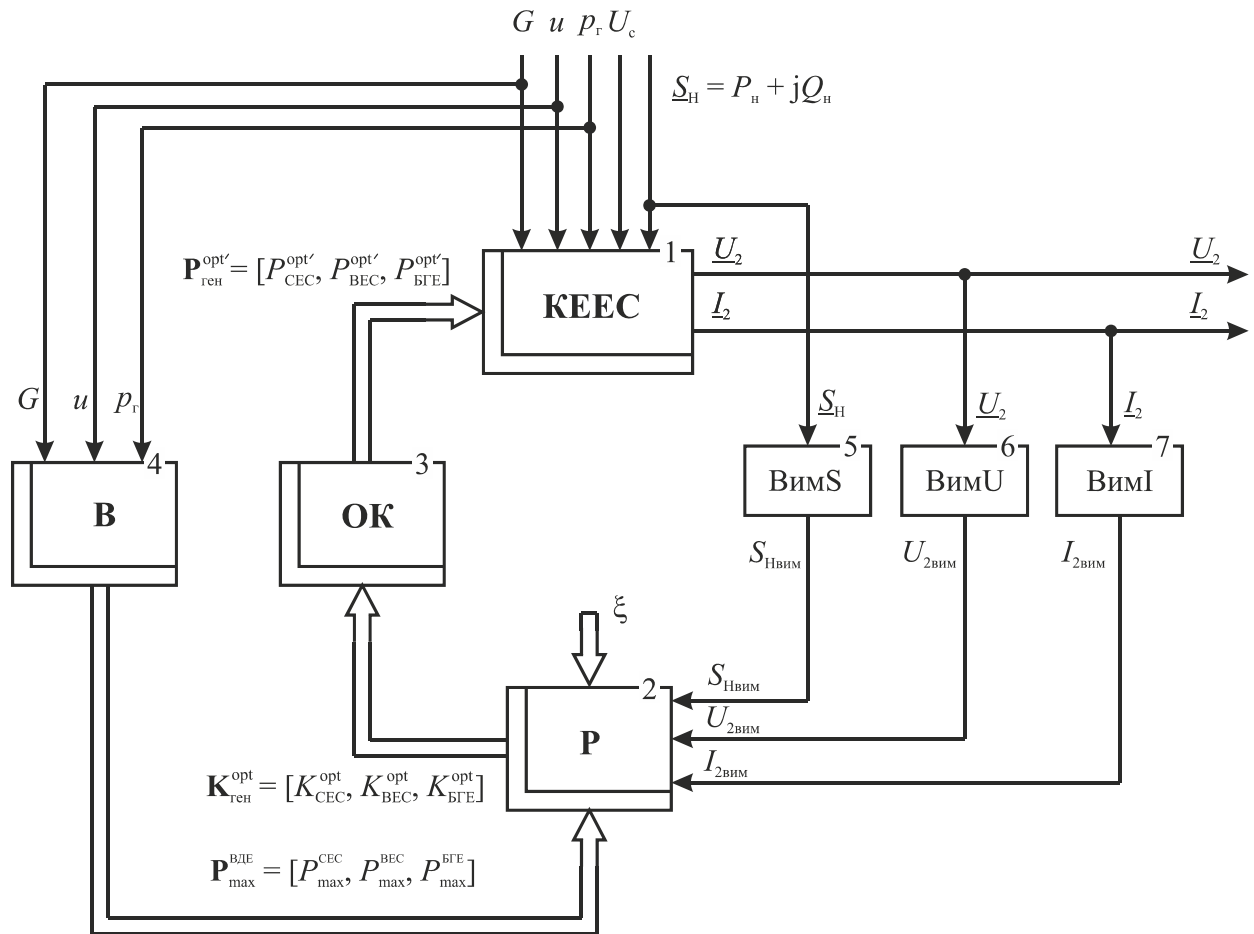


Рис 2.2. Узагальнена структурна схема САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

- В** – вимірювач параметрів первинних енергетичних потоків;
ВимS – вимірювач потужності навантаження електроспоживачів;
ВимU – вимірювач напруги на шинах електроспоживачів;
ВимI – вимірювач струму в лінії живлення;
 G – інтенсивність сонячного випромінювання, кВт/м^2 ;
 u – швидкість вітру, м/с ;
 p_r – тиск газу в газгольдері, кПа ;
 $\underline{U}_c$ – комплекс напруги в точці підключення до РЕМ (т. 0 на рис. 2.1);
 $\underline{U}_2$ – комплекс напруги в точці приєднання споживачів до шин (т. 2 на рис. 2.1);
 $\underline{I}_2$ – комплекс струму в лінії електропередачі;

$\underline{S}_H = P_H + jQ_H$ – комплексна потужність навантаження;

P_H – активна потужність навантаження електроспоживачів;

Q_H – реактивна потужність навантаження електроспоживачів;

$U_{2\text{вим}}$ – виміряне значення напруги U_2 ;

$S_{H\text{вим}}$ – виміряне значення повної потужності навантаження електроспоживачів S_H ;

$\mathbf{P}_{\text{max}}^{\text{ВДЕ}} = [P_{\text{max}}^{\text{СЕС}}, P_{\text{max}}^{\text{ВЕС}}, P_{\text{max}}^{\text{БГЕ}}]$ – вектор максимальних значень потужності ВДЕ;

$P_{\text{max}}^{\text{СЕС}}, P_{\text{max}}^{\text{ВЕС}}, P_{\text{max}}^{\text{БГЕ}}$ – максимальні значення потужностей СЕС, ВЕС, БГЕ відповідно;

$P_{\text{СЕС}}^{\text{opt}}, P_{\text{ВЕС}}^{\text{opt}}, P_{\text{БГЕ}}^{\text{opt}}$ – оптимальні значення потужностей СЕС, ВЕС, БГЕ відповідно, що визначені регулятором;

$\mathbf{K}_{\text{ген}}^{\text{opt}} = [K_{\text{СЕС}}^{\text{opt}}, K_{\text{ВЕС}}^{\text{opt}}, K_{\text{БГЕ}}^{\text{opt}}]$ – вектор оптимального керування визначений регулятором;

$K_{\text{СЕС}}^{\text{opt}}, K_{\text{ВЕС}}^{\text{opt}}, K_{\text{БГЕ}}^{\text{opt}}$ – складові вектора оптимального керування для установок СЕС, ВЕС, БГЕ відповідно, що визначені регулятором P за формулами $K_{\text{СЕС}}^{\text{opt}} = P_{\text{СЕС}}^{\text{opt}} / P_{\text{max}}^{\text{СЕС}}, K_{\text{ВЕС}}^{\text{opt}} = P_{\text{ВЕС}}^{\text{opt}} / P_{\text{max}}^{\text{ВЕС}}, K_{\text{БГЕ}}^{\text{opt}} = P_{\text{БГЕ}}^{\text{opt}} / P_{\text{max}}^{\text{БГЕ}}$;

$\mathbf{P}_{\text{ген}}^{\text{opt}'} = [P_{\text{СЕС}}^{\text{opt}'}, P_{\text{ВЕС}}^{\text{opt}'}, P_{\text{БГЕ}}^{\text{opt}'}]$ – вектор значень потужностей ВДЕ, що задається виконавчим пристроєм;

$P_{\text{СЕС}}^{\text{opt}'}, P_{\text{ВЕС}}^{\text{opt}'}, P_{\text{БГЕ}}^{\text{opt}'}$ – значення потужностей СЕС, ВЕС, БГЕ відповідно, що задається виконавчим пристроєм;

ξ – вектор задаючих параметрів.

Для досягнення поставленої мети дослідження було сформульоване наступне загальне завдання: за відомими значеннями параметрів електричної мережі, а також за вимірними значеннями потужності навантаження, напруги на затискачах електроспоживачів, струму в лінії живлення визначити такий алгоритм роботи регулятора, який би в режимі реального часу знаходив такі значення генерації активної потужності від ВДЕ, при яких

відхилення напруги та величина доходу від продажу електроенергії в електричну мережу були б оптимальними.

Для вирішення даного завдання перш за все необхідно провести обґрунтування методу розв'язку задачі керування (2.1).

2.2 Вибір методу розв'язання задачі автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

Проведений аналіз існуючих методів розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації [87-95] виду (2.1) показав, що найбільш поширеними є такі методи.

1. *Метод головного критерію* полягає в тому, що в якості цільової функції обирається один із критеріїв, а інші вводяться як обмеження. Обравши в якості головного критерію, наприклад дохід від генерації потужності ВДЕ у енергосистему з урахуванням «зеленого» тарифу $\Pi(P_{\text{ген}})$, задачу (2.1) можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} Q_1 = -\Pi(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ Q_2 = \mathcal{Z}_{\Delta U}(P_{\text{ген}}) \leq \mathcal{Z}_{\Delta U \max}; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\min} \dots P_{\max}], \end{cases} \quad (2.5)$$

де $\mathcal{Z}_{\Delta U \max}$ – верхнє обмеження критерію $\mathcal{Z}_{\Delta U}(P_{\text{ген}})$;

Недоліком даного методу є ускладненість вибору головного критерію із множини критеріїв, адже, як правило, критерії оптимізації знаходяться у протиріччі.

2. *Метод лінійного згортання* доцільно застосовувати у випадку, коли відома відносна важливість кожного з критеріїв. Суть даного методу розв'язку задач багатокритеріальної оптимізації полягає в лінійному об'єднанні всіх критеріїв шляхом введення вагових коефіцієнтів. Згідно даного методу розв'язок задачі (2.1) має вигляд:

$$\begin{cases} F_1(P_{\text{ген}}) = \sum_i^m e_i Q_i(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\min} \dots P_{\max}], \end{cases} \quad (2.6)$$

де $F_1(P_{\text{ген}})$ – цільова функція,

e_i – ваговий коефіцієнт для i -ї критеріальної функції, що враховує її важливість.

Недоліком даного методу є, насамперед, складність визначення числових значень вагових коефіцієнтів для досягнення бажаного співвідношення критеріїв в точці оптимуму. Також нерідко спостерігається неприпустимо велика чутливість розв'язку відносно цих вагових коефіцієнтів.

3. *Мінімаксні (максимінні) методи* засновані на пошуку компромісного розв'язку. Для задачі (2.1) вираз для знаходження розв'язку згідно мінімаксного методу матиме вигляд:

$$\begin{cases} F_2(P_{\text{ген}}) = \max_{i=1, \dots, m} Q_i(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\min} \dots P_{\max}], \end{cases} \quad (2.7)$$

де $F_2(P_{\text{ген}})$ – цільова функція.

Недоліком даного методу, як і у попередньому випадку, є неможливість отримання в точці оптимуму бажаного співвідношення між критеріями $Q_i(P_{\text{ген}})$.

4. *Адаптивний метод* заснований на використанні оцінок експертів. Суть даного методу полягає в наступному. Перш за все знаходиться парето-оптимальна множина розв'язків задачі багатокритеріальної оптимізації. Далі експерту надається певна точка $P_{\text{ген}j}$ на парето-оптимальній множині розв'язків, і вказуються числові значення всіх критеріїв $Q_i(P_{\text{ген}})$ в цій точці. Після цього експерт вирішує, по якому з критеріїв виконувати мінімізацію в

конкретних умовах. В отриманій точці $P_{\text{ген}j+1}$ визначаються числові значення всіх критеріїв $Q_i(P_{\text{ген}})$, і знову надаються експерту і так далі до тих пір, доки експерт не зупиниться на розв'язку $P_{\text{ген}}^*$, який він визнає оптимальним.

Даний метод застосовується переважно для вирішення задач типу проектних. Так як для реалізації даного методу розв'язку необхідно залучати експерта – людину, його неможливо застосовувати для швидкодіючих систем керування.

5. *Метод наближення до утопічної (ідеальної) точки* в просторі критеріїв дає можливість подолати невизначеність в обґрунтуванні важливості критеріїв $Q_i(P_{\text{ген}})$.

Під утопічною точкою слід розуміти точку $Q_{\text{ут}} = (Q_{1\min}, Q_{2\min})$, координатами якої є оптимальні (мінімальні) значення для кожного з критеріїв $Q_i(P_{\text{ген}})$.

Вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації методом наближення до утопічної точки здійснюється за два кроки:

Крок 1. В результаті визначення оптимального значення кожного з критеріїв знаходяться координати утопічної точки $Q_{\text{ут}} = (Q_{1\min}, Q_{2\min})$ в просторі критеріїв оптимізації $Q \subset \mathbb{R}^2$.

Крок 2. Шляхом розв'язку серії задач мінімізації відстані ρ (в одній із метрик) від утопічної точки до парето-оптимальної множини розв'язків в просторі критеріїв знаходяться координати розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації $P_{\text{ген}}^{\text{opt}}$ в просторі керування $P^{\text{opt}} \subset \mathbb{R}^3$.

Вираз для визначення відстані ρ для випадку довільної метрики має вигляд:

$$\rho_{L^p} = \left(\sum_{i=1}^m |Q_i(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ути}}|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (2.8)$$

Для випадку $p = 2$ (евклідова відстань) знаходження кінцевого розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації (2.1) набуває вигляду:

$$\begin{cases} F_3(P_{\text{ген}}) = \sqrt{\frac{(Q_1(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ут1}})^2}{\zeta_1} + \frac{(Q_2(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ут2}})^2}{\zeta_2}} \rightarrow \min; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\min} \dots P_{\max}] \end{cases} \quad (2.9)$$

де ζ_1 та ζ_2 – вагові коефіцієнти, що враховують відносну важливість кожного з критеріїв.

Для випадку $p \rightarrow \infty$ (чебишевська відстань) знаходження кінцевого розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації (2.1) набуває вигляду:

$$\begin{cases} F_4(P_{\text{ген}}) = \max \left\{ \frac{Q_1(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ут1}}}{\zeta_1}, \frac{Q_2(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ут2}}}{\zeta_2} \right\} \rightarrow \min; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\min} \dots P_{\max}] \end{cases} \quad (2.10)$$

Геометрична інтерпретація розв'язків задачі багатокритеріальної оптимізації (2.1) методом наближення до утопічної точки для випадків мінімізації евклідової та чебишевської відстані (отримана в результаті розрахунку числового тестового прикладу) зображена на рис. (рис. 2.3).

На рис. 2.3:

$Q_{1\min}, Q_{2\min}$ – мінімальні значення критеріїв Q_1, Q_2 відповідно;

$\rho_{\text{evk}}, \rho_{p \rightarrow \infty}$ – відповідно мінімальні евклідова та чебишевська відстані від утопічної точки до парето-оптимальної множини розв'язків;

$Q_{\text{evk}}^{\text{opt}}, Q_{p \rightarrow \infty}^{\text{opt}}$ – кінцеві розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації для випадку мінімізації евклідової та чебишевської відстаней відповідно;

γ – кут між віссю абсцис та відрізком $Q_{\text{ут}} Q_{p \rightarrow \infty}^{\text{opt}}$ (мінімальна чебишевська відстань між утопічною точкою та парето-оптимальною множиною розв'язків).

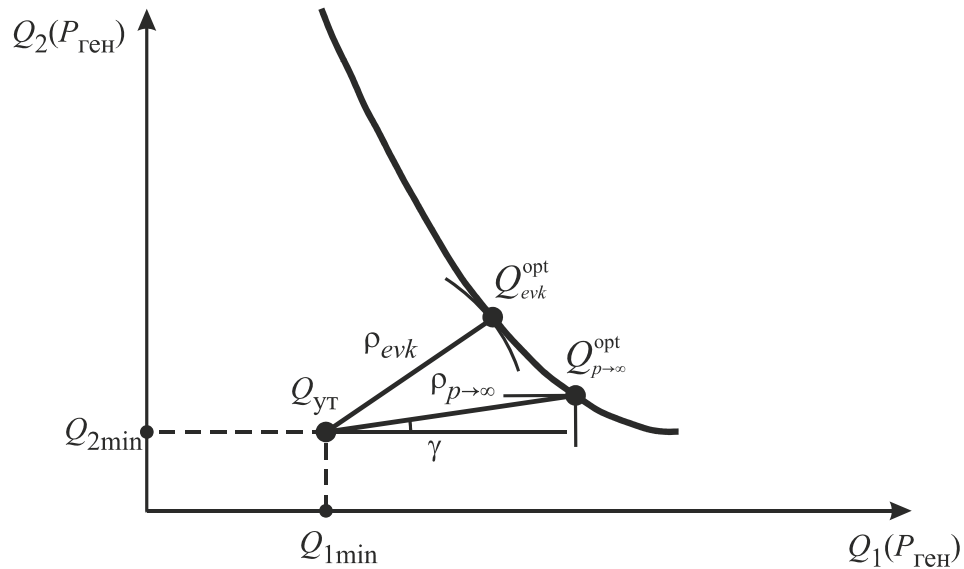


Рис. 2.3. Геометрична інтерпретація розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації методом наближення до утопічної точки

Як видно з рис. 2.3, для випадку мінімізації чебишевської відстані отримати бажане співвідношення критеріїв у точці оптимуму більш просто, ніж для випадку евклідової відстані. Це пояснюється тим, що для випадку мінімізації чебишевської відстані бажане співвідношення критеріїв у точці оптимуму однозначно визначається значеннями коефіцієнтів ζ_1 та ζ_2 :

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\zeta_2}{\zeta_1} \quad (2.11)$$

Тому застосування саме такого підходу до вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації (2.1) є найбільш доцільним.

2.3 Знаходження розв'язку задачі автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

Як зазначалось вище, вирішення задачі (2.1) методом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв із застосуванням чебишевської відстані (2.10) зводиться до вирішення серії задач скалярної оптимізації.

Існує досить велика кількість методів скалярної оптимізації функції багатьох змінних. Їх можна розділити на дві групи: методи, що знаходять розв'язок в аналітичному вигляді та чисельні методи.

Як правило, методи першої групи застосовують лише для задач відносно невисокої складності. Так як в більшості випадків, навіть якщо вдається знайти аналітичний розв'язок такої задачі, він виявляється досить громіздким і мало придатним для практичного застосування.

Для вирішення більшості практичних задач скалярної оптимізації функції багатьох змінних, як правило, застосовують чисельні методи, такі як метод Ньютона, метод Нелдера-Міда [87, 88, 92] та ін. Вибір методу оптимізації обумовлюється ступенем складності задачі та її специфікою.

Як видно з узагальненої структурної схеми САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС (рис. 2.2), в якості виконавчих пристроїв, що здійснюють керуючі впливи, виступають інвертор СЕС, керований випрямляч ВЕС, пристрій зміни положення дросель-клапана подачі палива в складі БГЕ). Точність регулювання генерованої потужності складає близько 1 %. Тому, для вирішення задачі (2.1) немає необхідності застосовувати метод скалярної оптимізації, який би забезпечував високий ступінь точності. Зважаючи на відносно малу розмірність задачі керування (2.1) (два критерії оптимізації, один керуючий вплив) її розв'язок найдоцільніше шукати в дискретному вигляді методом повного перебору.

Тому для пошуку координат утопічної точки Q_{1min} , Q_{2min} та мінімальних відстаней від утопічної точки до парето-оптимальної множини розв'язків застосовується метод повного перебору, що є одним із методів вирішення

математичних задач. Як зазначено в [93] метод повного перебору включає в себе ряд різних методів, а постановка задачі передбачає аналіз скінченного числа станів системи, метою якого є виявлення істинності логічного твердження, що досягається шляхом аналізу кожного стану.

Складність і тривалість вирішення задачі даним методом залежить від кількості можливих розв'язків задачі. Якщо простір $[P_{\min} \dots P_{\max}]$, на якому шукається розв'язок, значний, то його пошук може займати тривалий час. За умови апаратної реалізації даного методу в швидкодіючій САК та істотній дискретизації простору пошуку $[P_{\min} \dots P_{\max}]$ це спричинює затримку в часі прийняття керуючого впливу.

Для скорочення часу пошуку координат утопічної точки відносно методу повного перебору застосовується методи комбінаторної оптимізації. Суть комбінаторної оптимізації полягає в пошуку оптимального об'єкта в скінченній множині об'єктів і зводиться до визначення ефективного розподілу ресурсів для пошуку оптимального рішення. Комбінаторна оптимізація включає в себе задачі оптимізації, в яких множина допустимих рішень дискретна або може бути зведена до дискретної множини [94, 95]. Задачі комбінаторної оптимізації можна розглядати як пошук найкращого елемента в деякій дискретній множині, тому можуть бути використані будь-які алгоритми пошуку або метаевристичні алгоритми.

За такого підходу, вирішення задачі керування (2.1) полягає [83] в наступному:

1. Проводиться дискретизація області допустимих значень потужності $[P_{\min} \dots P_{\max}]$ з кроком $\Delta P_{\text{ген}}$.
2. Для кожного із значень $P_{\text{ген}i}$ розраховуються значення критеріїв Q_1 , Q_2 . В результаті отримується скінченна множина значень:

$$D = \{d_1[Q_1(P_{\text{ген}1}), Q_2(P_{\text{ген}1})], \dots, d_i[Q_1(P_{\text{ген}i}), Q_2(P_{\text{ген}i})]\} \quad (2.12)$$

3. З допомогою методу повного перебору знаходяться координати утопічної точки $Q_{yt} = (Q_{1min}, Q_{2min})$ (мінімальне та максимальне значення елементів множини D).

4. Знаходяться відстані l між елементами множини парето-оптимальних розв'язків D та променем m , що виходить з утопічної точки Q_{yt} під кутом γ . Для цього необхідно скористатись наступною формулою:

$$l_i = \left[\left(\frac{Q_{1i} + \frac{\zeta_2}{\zeta_1} Q_{2i} - \frac{\zeta_2}{\zeta_1} Q_{2min}}{\left(\frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right)^2 + 1} - Q_{1i} \right)^2 + \left(\frac{\zeta_2}{\zeta_1} \frac{Q_{1i} + \frac{\zeta_2}{\zeta_1} Q_{2i} - \frac{\zeta_2}{\zeta_1} Q_{2min}}{\left(\frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right)^2 + 1} + Q_{2min} - Q_{2i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

В результаті отримується скінченна множина таких відстаней $L = \{l_1 \dots l_i\}$

5. Методом повного перебору знаходиться мінімальний елемент l_{min} множини L . Кінцевим розв'язком задачі (2.1) буде елемент d_{lmin} множини D , що відповідає мініимальному елементу l_{min} множини L .

Геометрична інтерпретація описаного алгоритму знаходження розв'язку задачі (2.1) зображена на рис. 2.4.

На рис. 2.4:

Q_{1yt}, Q_{2yt} – координати утопічної точки Q_{yt} ;

$d_1 \dots d_i$ – елементи парето-оптимальної множини розв'язків D ;

$l_1 \dots l_i$ – відстані між елементами парето-оптимальної множини розв'язків D та променем m , що виходить з утопічної точки Q_{yt} під кутом γ .

методом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв. При цьому кінцевий розв'язок такої задачі найбільш доцільно знаходити в результаті вирішення задачі мінімізації чебишевської відстані від утопічної точки до парето-оптимальної множини рішень.

3. Зважаючи на мікропроцесорну реалізацію САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС, а також дискретність кроку регулювання потужності генерації для вирішення задач знаходження координат утопічної точки, а також задачі мінімізації чебишевської відстані від утопічної точки до парето-оптимальної множини рішень найдоцільніше скористатись розрахунковою процедурою, що базується на одному із методів дискретної оптимізації функції декількох змінних, а саме на методі повного перебору.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВ’ЯЗКУ ЗАДАЧІ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГЕНЕРАЦІЄЮ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В КОМБІНОВАНІЙ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ

Результати та висновки проведених теоретичних досліджень, а також ефект від їх застосування, необхідно підтвердити шляхом математичного моделювання процесу автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

Побудова математичної моделі САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС була виконана в Simulink – розширенні для моделювання і аналізу динамічних систем, що входить до складу пакету Matlab. Моделювання роботи САК проводилось в іменованих одиницях.

Для проведення аналізу ефекту від розв’язків задачі керування (2.1) необхідно отримати реальні результати керування. Тому в якості вихідних даних для моделювання були взяті реальні результати вимірювання навантаження споживачів агропромислового комплексу. Дані про інтенсивність сонячного випромінювання, швидкість вітру взяті для метеорологічних умов м. Кропивницький. При моделюванні було враховано можливість різкої зміни вхідних сигналів – шум.

Таким чином для проведення аналізу ефекту від застосування розв’язків задачі керування (2.1) шляхом математичного моделювання необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити математичні моделі елементів КЕЕС з ВДЕ.
- розробити структурну схему САК та алгоритм визначення вектора керування рівнем генерації активної потужності ВДЕ в КЕЕС на основі отриманих розв’язків задачі керування (2.1).

– розробити імітаційну модель САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

– провести дослідження на стійкість розробленої САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

– провести аналіз ефекту від застосування розв’язків задачі керування (2.1) шляхом комп’ютерного імітаційного моделювання, використовуючи розроблену комп’ютерну модель САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

Вирішенню описаних завдань і присвячений даний розділ роботи.

3.1 Математична модель об’єкту керування

Для проведення математичного моделювання процесу автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС необхідно розробити в першу чергу модель об’єкту керування – КЕЕС з ВДЕ.

На рис. 3.1 приведена принципова схема КЕЕС з ВДЕ.

На рис. 3.1:

С – районна електрична мережа;

Т1 – силовий трансформатор ТМ-160/10;

КЛ1 – кабельна лінія 0,4 кВ, виконана кабелем ААШв-0,4(3х120) довжиною 250 м;

Н – електричне навантаження електроспоживачів;

СЕС – сонячна електростанція;

ІНВ_{СЕС} – інвертор сонячної електростанції;

СБ – поле сонячних батарей;

ВЕС – вітрова електростанція;

ІНВ_{ВЕС} – інвертор вітрової електростанції;

КВ_{ВЕС} – керований випрямляч вітрової електростанції;

ВГ – вітроелектрогенератор;

БГЕ – біогазова електростанція;

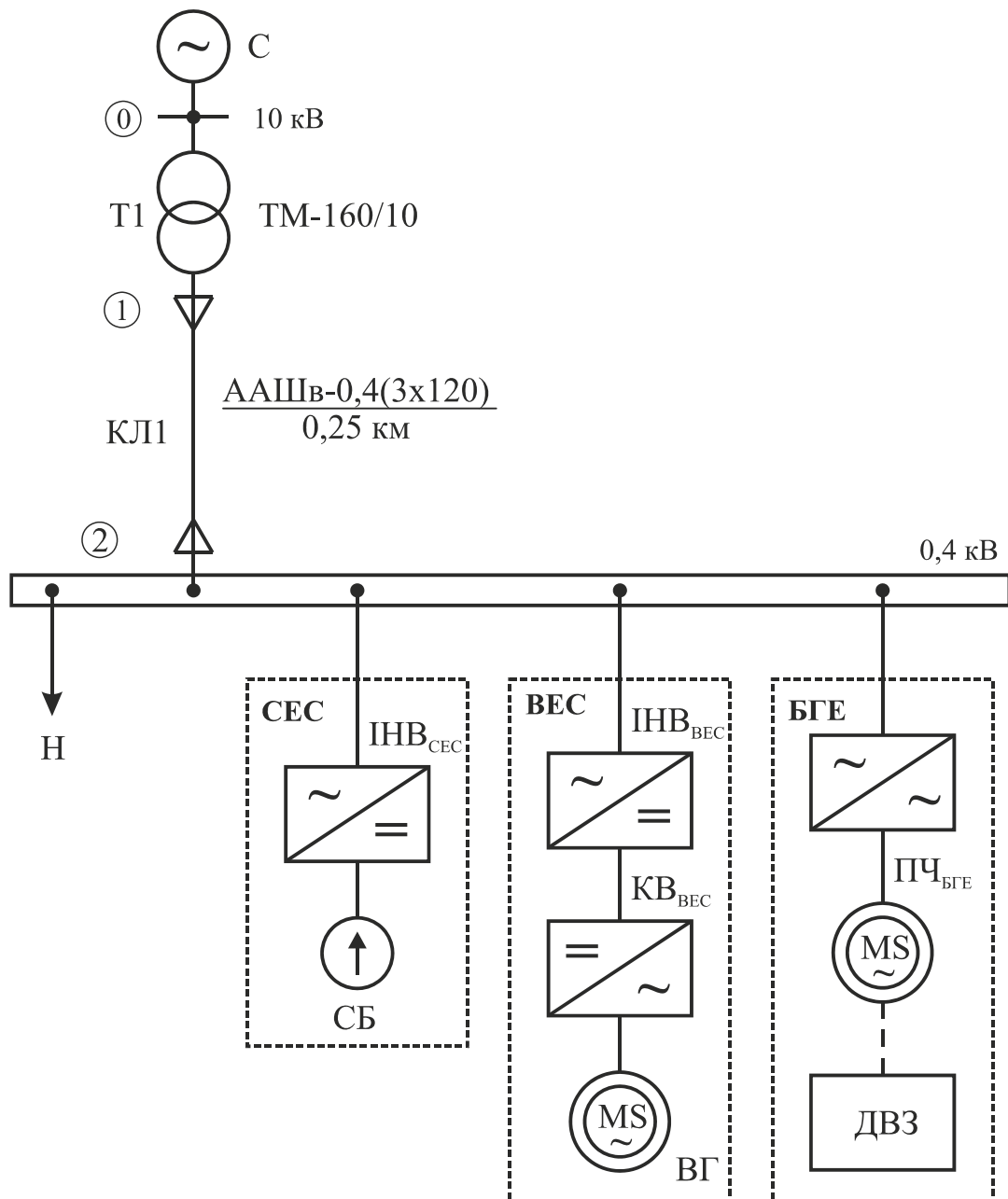


Рис. 3.1. Принципова схема комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії

MS – синхронний електрогенератор;

ДВЗ – двигун внутрішнього згорання біогазової електростанції

ПЧ_{БГЕ} – перетворювач частоти біогазової електростанції.

Основними елементами для математичного моделювання розподільної мережі є: районна електрична мережа С, знижувальний трансформатор Т1 та кабельна лінія електропередачі КЛ1.

Районна електрична мережа моделюється ідеальним джерелом напруги U_c з послідовно з'єднаними активним та реактивним опорами r_c , x_c ; трансформатор Т1 моделюється активним та індуктивним опорами r_T , x_T ; кабельна лінія моделюється питомими активним та індуктивним опорами $r_{кл}$, $x_{кл}$ на 1 км довжини.

Основними елементами КЕЕС з ВДЕ є: сонячні фотобатареї; вітроелектрогенератор; двигун внутрішнього згорання з електрогенератором; перетворювач струму (інвертор).

3.1.1. Математична модель фотоелектричної батареї. Розрахунок вихідної потужності фотоелектричної батареї (ФЕБ) виконується за наступною формулою [96, 76]

$$P_{\text{ФЕБ}}(t) = P_{\text{ФЕБном}} k_{\text{з.е.}} \frac{\bar{I}_{\beta}(t)}{I_{\text{су}}} [1 + \alpha_P (\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) - \vartheta_{\text{су}})], \quad (3.1)$$

де: $P_{\text{ФЕБ}}(t)$ – вихідна потужність ФЕБ, кВт;

$P_{\text{ФЕБном}}$ – номінальна потужність ФЕБ при стандартних умовах, кВт;

$k_{\text{з.е.}}$ – коефіцієнт зниження ефективності ФЕБ;

$\bar{I}_{\beta}(t)$ – середнє значення густини потоку сонячного випромінювання, яке потрапляє на поверхню ФЕБ за годинний інтервал, Вт/м²;

$I_{\text{су}}$ – густина потоку сонячного випромінювання, яке потрапляє на поверхню ФЕБ при стандартних умовах, кВт/м²;

α_P – температурний коефіцієнт потужності ФЕБ, °С⁻¹ (як правило величина α_P від'ємна, що свідчить про зменшення ефективності ФЕБ з ростом температури);

$\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t)$ – поточна температура ФЕБ, °С;

$\vartheta_{\text{су}}$ – температура ФЕБ при стандартних умовах, °С.

Під стандартними умовами розуміють наступні: густина потоку сонячного випромінювання $I_{\text{су}} = 1 \text{ кВт/м}^2$, температура поверхні ФЕБ

$\vartheta_{\text{ФЕБ}} = 25^\circ\text{C}$. Параметри, які отримуються при цих умовах називаються номінальними параметрами ФЕБ.

Якщо зміну потужності ФЕБ при зміні температури не враховувати, то формула (3.1) спрощується [96]:

$$P_{\text{ФЕБ}}(t) = P_{\text{ФЕБном}} k_{\text{з.е.}} \frac{\bar{I}_{\beta}(t)}{I_{\text{су}}}. \quad (3.2)$$

Температура ФЕБ – це температура її поверхні. В нічний час доби температура поверхні батареї дорівнює температурі оточуючого середовища, а при освітленні сонячними променями може перевищувати температуру оточуючого середовища понад 30°C .

Температуру ФЕБ можна знайти з рівняння балансу потужностей [97], яке відображає баланс між сонячною енергією, що падає на ФЕБ, електричною потужністю і тепловіддачею в оточуюче середовище:

$$\tau \alpha I_{\beta}(t) = \eta_{\text{ФЕБ}} I_{\beta}(t) + \alpha_{\text{ФЕБ}} [\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) - \vartheta_0(t)], \quad (3.3)$$

де: τ – коефіцієнт пропускання ФЕБ;

α – коефіцієнт поглинання ФЕБ;

$I_{\beta}(t)$ – густина потоку сонячного випромінювання, яке потрапляє на поверхню ФЕБ, $\text{кВт}/\text{м}^2$;

$\eta_{\text{ФЕБ}}$ – ККД ФЕБ;

$\alpha_{\text{ФЕБ}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від ФЕБ в оточуюче середовище, $\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

$\vartheta_0(t)$ – температура оточуючого середовища, $^\circ\text{C}$.

Розв'язавши (3.3) відносно $\vartheta_{\text{ФЕБ}}$, отримаємо:

$$\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) = \vartheta_0(t) + I_{\beta}(t) \frac{\tau \alpha}{\alpha_{\text{ФЕБ}}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{ФЕБ}}}{\tau \alpha} \right). \quad (3.4)$$

Так як величину $\frac{\tau\alpha}{\alpha_{\text{ФЕБ}}}$ практично виміряти дуже важко, тому використовують технічні дані виробників. В режимі роботи без навантаження (3.4) матиме вигляд:

$$\frac{\tau\alpha}{\alpha_{\text{ФЕБ}}} = \frac{\vartheta_{\text{ФЕБ ном}} - \vartheta_{0 \text{ ном}}}{I_{\text{ном}}}, \quad (3.5)$$

де: $\vartheta_{\text{ФЕБ ном}}$ – номінальна робоча температура ФЕБ при випробуваннях, °C;

$\vartheta_{0 \text{ ном}}$ – температура оточуючого середовища, при якій проводяться випробування і визначається $\vartheta_{\text{ФЕБ ном}}$, °C, (як правило $\vartheta_{0 \text{ ном}} = 20 \text{ °C}$);

$I_{\text{ном}}$ – густина потоку сонячного випромінювання, яке потрапляє на поверхню ФЕБ при проведенні випробувань, кВт/м², (як правило $I_{\text{ном}} = 800 \text{ Вт/м}^2$).

Для спрощення будемо вважати, що величина $\frac{\tau\alpha}{\alpha_{\text{ФЕБ}}}$ постійна, тоді рівняння (3.4) можна представити у вигляді:

$$\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) = \vartheta_0(t) + I_{\beta}(t) \frac{\vartheta_{\text{ФЕБ ном}} - \vartheta_{0 \text{ ном}}}{I_{\text{ном}}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{ФЕБ}}}{\tau\alpha} \right). \quad (3.6)$$

Приймемо, що величина $\tau\alpha = 0,9$ [96]. Оскільки величина відношення $\frac{\eta_{\text{ФЕБ}}}{\tau\alpha}$ значно менша одиниці, то попереднє допущення не вносить значної похибки.

Вважатимемо також, що система керування ФЕБ автоматично підтримує режим роботи в точці відбору максимальної потужності. Це означає, що ККД ФЕБ завжди має максимальне значення:

$$\eta_{\text{ФЕБ}} = \eta_{\text{ФЕБ max}}, \quad (3.7)$$

де $\eta_{\text{ФЕБ max}}$ – ККД ФЕБ в точці відбору максимальної потужності.

Враховуючи (3.7) рівняння (3.6) набуває вигляду:

$$\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) = \vartheta_0(t) + (\vartheta_{\text{ФЕБ ном}} - \vartheta_{0 \text{ ном}}) \frac{I_{\beta}(t)}{I_{\text{ном}}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{ФЕБ max}}(t)}{\tau \alpha} \right). \quad (3.8)$$

Величина $\eta_{\text{ФЕБ max}}$ залежить від температури. Вважатимемо, що ККД змінюється за лінійним законом згідно рівняння:

$$\eta_{\text{ФЕБ max}}(t) = \eta_{\text{ФЕБ max су}} [1 + \alpha_P (\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) - \vartheta_{\text{су}})], \quad (3.9)$$

де $\eta_{\text{ФЕБ max су}}$ – ККД ФЕБ в точці максимальної потужності при стандартних умовах.

Підставивши вираз (3.9) у (3.8) отримаємо рівняння для визначення поточної температури ФЕБ:

$$\begin{aligned} \vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) = \vartheta_0(t) + (\vartheta_{\text{ФЕБ ном}} - \vartheta_{0 \text{ ном}}) \frac{I_{\beta}(t)}{I_{\text{ном}}} \times \\ \times \left(1 - \frac{\eta_{\text{ФЕБ max су}} [1 + \alpha_P (\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) - \vartheta_{\text{су}})]}{\tau \alpha} \right). \end{aligned} \quad (3.10)$$

Виконавши еквівалентні перетворення у формулі (3.10) визначимо температуру ФЕБ у момент часу t :

$$\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) = \frac{\vartheta_0(t) + (\vartheta_{\text{ФЕБ ном}} - \vartheta_{0 \text{ ном}}) \frac{I_{\beta}(t)}{I_{\text{ном}}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{ФЕБ max CY}} (1 - \alpha_P \vartheta_{\text{CY}})}{\tau \alpha} \right)}{1 + (\vartheta_{\text{ФЕБ ном}} - \vartheta_{0 \text{ ном}}) \frac{I_{\beta}(t)}{I_{\text{ном}}} \frac{\eta_{\text{ФЕБ max CY}} \alpha_P}{\tau \alpha}}. \quad (3.11)$$

Якщо значення $\eta_{\text{ФЕБ max CY}}$ не зазначено в документації, то воно визначається із наступного рівняння:

$$\eta_{\text{ФЕБ, max CY}} = \frac{P_{\text{ФЕБ ном}}}{F_{\text{ФЕБ}} I_{\text{CY}}}, \quad (3.12)$$

де $F_{\text{ФЕБ}}$ – площа ФЕБ, м².

Таким чином рівняння 3.1-3.12 являють математичну модель фотоелектричної батареї як джерела електричної енергії.

3.1.2. Математична модель вітрогенератора. Потужність, що віддається вітрогенератором в мережу залежить від швидкості вітру, висоти мачти, на якій встановлено генератор та вихідній характеристиці генератора. Так як швидкість повітря біля поверхні землі залежить від висоти, а потужність, що віддається вітрогенератором залежить від кубу швидкості повітря, висота мачти сильно впливає на вихідну потужність. При розрахунку вихідної потужності вітроелектричної установки (ВЕУ) дані вимірювання середньочасової швидкості повітря необхідно привести до висоти установки вітрогенератора.

Найчастіше для перерахунку швидкості повітря з висоти установки анемометра на задану висоту (висоту установки вітрогенератора) використовують наступні закони [34]:

а) логарифмічний

$$u_h = u_{\text{анем}} \frac{\ln \frac{h}{z_0}}{\ln \frac{h_{\text{анем}}}{z_0}}, \quad (3.13)$$

де u_h – швидкість повітря на висоті h ;

$u_{\text{анем}}$ – швидкість повітря на висоті установки анемометра $h_{\text{анем}}$;

z_0 – параметр, що характеризує нерівномірність поверхні землі.

б) потенційний

$$u_h = u_{\text{анем}} \left(\frac{h}{h_{\text{анем}}} \right)^\alpha, \quad (3.14)$$

де α – показник степеня, який залежить від нерівномірності поверхні землі

Зазвичай вихідна характеристика потужності ВЕУ задається парами експериментальних точок $\{u_i, P_{\text{ВЕУ СУ } i}\}$, які знімаються при стандартній температурі та тиску ($p_0 = 101,325$ кПа, $T_0 = 288,15$ К). Для знаходження значень потужності в проміжних точках використовують різного роду апроксимацію експериментальних точок (наприклад кусково-лінійну, сплайнову тощо). В роботі характеристика потужності ВЕУ апроксимувалась сумою трьох функцій Гауса:

$$P_{\text{ВЕУ СУ}}(u) = a_1 \exp \left[- \left(\frac{u - b_1}{c_1} \right)^2 \right] + a_2 \exp \left[- \left(\frac{u - b_2}{c_2} \right)^2 \right] + a_3 \exp \left[- \left(\frac{u - b_3}{c_3} \right)^2 \right], \quad \forall u \in [0, u_{\text{max}}]; \quad (3.15)$$

де $P_{\text{BEY CY}}(u)$ – вихідна потужність генератора при стандартних умовах;

u – швидкість вітру на висоті установки вітрогенератора;

$a_1, \dots, a_3, \quad b_1, \dots, b_3, \quad c_1, \dots, c_3$ – сталі коефіцієнти, що визначаються апроксимацією експериментальних даних (кількість пар $N > 9$).

Так як потужність ВЕУ прямо пропорційна густині повітря, то при значеннях тиску та температури повітря відмінних від стандартних, потужність буде визначатись залежністю [34]:

$$P_{\text{BEY}}(u) = \frac{\rho(h)}{\rho_0} P_{\text{BEY CY}}(u), \quad (3.16)$$

де ρ – реальна густина повітря;

$\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря при стандартних умовах.

Повітря можна вважати за ідеальний газ, і визначати густину як [98]:

$$\rho = \frac{pM}{RT}, \quad (3.17)$$

де p – тиск повітря;

$M = 28,98 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ – молекулярна маса повітря;

$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ – універсальна газова стала;

T – абсолютна температура повітря.

Тиск та температура повітря, а відповідно і його густина будуть залежати від висоти над рівнем моря. У диференційній формі ця залежність буде описуватись основним рівнянням статики атмосфери [99]:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{Mg}{RT} dh, \quad (3.18)$$

де g – прискорення вільного падіння.

Згідно з моделлю стандартної атмосфери [100], реальна атмосфера вважається політропною, тобто такою, в якій температура змінюється з висотою за лінійним законом зі швидкістю $\nu = 0,0065$ К/м. Барометрична формула для такої атмосфери – розв’язок основного рівняння статики за умови, що

$$T(h) = T_0 - \nu h, \quad (3.19)$$

має вигляд [99]:

$$p(h) = p_0 \left(1 - \frac{\nu h}{T_0} \right)^{\frac{Mg}{\nu R}}. \quad (3.20)$$

Враховуючи (3.17), (3.19), (3.20):

$$\frac{\rho(h)}{\rho_0} = \frac{p(h)}{p_0} \frac{T_0}{T(h)} = \left(1 - \frac{\nu h}{T_0} \right)^{\frac{Mg}{\nu R}} \left(\frac{T_0}{T_0 - \nu h} \right). \quad (3.21)$$

Таким чином рівняння 3.13-3.21 являють математичну модель вітрогенератора як джерела електричної енергії.

3.1.3. Математична модель двигуна внутрішнього згорання. При проектуванні систем електропостачання, в яких використовується електричний генератор (ЕГ) з двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ), може представляти інтерес як годинна витрата палива установкою, так і питома витрата палива для виробництва однієї кВт·год електроенергії. Ці дані можуть бути отримані із паспорту, або визначені дослідним шляхом.

Тож при моделюванні роботи генератора електричної енергії з ДВЗ [77] найважливішими параметрами моделі є:

а) об'єм споживання палива, яке необхідне для підтримання виробництва одиниці електричної енергії q , л/кВт·год;

б) годинна витрата палива під час роботи m , л/год;

в) ККД генератора з двигуном внутрішнього згорання $\eta^{\text{ДВЗ}}$.

Як правило в технічних даних на ДВЗ з генератором приводять наступні дані:

а) номінальна потужність ДВЗ $P_{\text{НОМ}}^{\text{ДВЗ}}$, кВт;

б) об'єм паливного баку V_6 , л;

в) тривалість роботи з однією заправкою при 50 % , 75 % та 100 % навантаженні, відповідно $t_p^{50\%}$, $t_p^{75\%}$ та $t_p^{100\%}$, год.

За паспортними даними можна визначити наступні величини:

а) питому витрату палива q ДВЗ при роботі з навантаженням 50 % , 75 % та 100 % відповідно:

$$q^{50\%} = \frac{V_6}{0,5 \cdot P_{\text{НОМ}}^{\text{ДВЗ}} \cdot t_p^{50\%}}, \quad q^{75\%} = \frac{V_6}{0,75 \cdot P_{\text{НОМ}}^{\text{ДВЗ}} \cdot t_p^{75\%}}, \quad q^{100\%} = \frac{V_6}{1 \cdot P_{\text{НОМ}}^{\text{ДВЗ}} \cdot t_p^{100\%}}$$

б) годинну витрату палива m двигуном при роботі з навантаженням 50 % , 75 % та 100 % відповідно:

$$m^{50\%} = \frac{V_6}{t_p^{50\%}}, \quad m^{75\%} = \frac{V_6}{t_p^{75\%}}, \quad m^{100\%} = \frac{V_6}{t_p^{100\%}}$$

Для можливості визначення витрати палива при завантаженні менше 50 % за координатами трьох точок можна шляхом апроксимації підібрати параболічну функцію, яка буде проходити через ці точки. Таким чином отримаємо дві квадратичні залежності:

а) залежність годинної витрати палива від коефіцієнта завантаження

$$m_i = m_2 \left(\frac{P_i^{\text{ДВЗ}}}{P_{\text{НОМ}}^{\text{ДВЗ}}} \right)^2 + m_1 \left(\frac{P_i^{\text{ДВЗ}}}{P_{\text{НОМ}}^{\text{ДВЗ}}} \right) + m_0, \quad (3.22)$$

де m_i – поточна годинна витрата палива в i -годину, л/год;

m_2, m_1, m_0 – коефіцієнти апроксимації, л/год;

$P_i^{\text{ДВЗ}}$ – поточне електричне навантаження генератора в i -годину, кВт;

$P_{\text{НОМ}}^{\text{ДВЗ}}$ – номінальна потужність генератора, кВт.

б) залежність питомої витрати палива від коефіцієнта завантаження

$$q_i = q_2 \left(\frac{P_i^{\text{ДВЗ}}}{P_{\text{НОМ}}^{\text{ДВЗ}}} \right)^2 + q_1 \left(\frac{P_i^{\text{ДВЗ}}}{P_{\text{НОМ}}^{\text{ДВЗ}}} \right) + q_0, \quad (3.23)$$

де q_i – поточна питома витрата палива в i -годину, л/кВт·год;

q_2, q_1, q_0 – коефіцієнти апроксимації, л/кВт·год;

$P_i^{\text{ДВЗ}}$ – поточне електричне навантаження генератора в i -годину, кВт;

$P_{\text{НОМ}}^{\text{ДВЗ}}$ – номінальна потужність генератора, кВт.

Основною ж характеристикою генератора є коефіцієнт корисної дії, для визначення якого можна скористатися формулою, що запропонована в [101]:

$$\eta^{\text{ДВЗ}} = \frac{P^{\text{ДВЗ}}}{Q \cdot m}, \quad (3.24)$$

де $\eta^{\text{ДВЗ}}$ – коефіцієнт корисної дії генератора, в.о.;

$P^{\text{ДВЗ}}$ – потужність двигуна, кВт;

Q – теплота згорання палива, кВт·год/л, для дизельного палива – 10,08 кВт·год/л, для бензину – 9,43 кВт·год/л, для біогазу – 8,3 кВт·год/л;

m – витрата палива, л/год.

На основі паспортних даних можна визначити ККД генератора з ДВЗ при 50 %, 75 % та 100 % навантаженні, відповідно $\eta_{50\%}^{\text{ДВЗ}}$, $\eta_{75\%}^{\text{ДВЗ}}$ та $\eta_{100\%}^{\text{ДВЗ}}$:

$$\eta_{50\%}^{\text{ДВЗ}} = \frac{0,5 \cdot P^{\text{ДВЗ}}}{Q \cdot m^{50\%}}, \quad \eta_{75\%}^{\text{ДВЗ}} = \frac{0,75 \cdot P^{\text{ДВЗ}}}{Q \cdot m^{75\%}}, \quad \eta_{100\%}^{\text{ДВЗ}} = \frac{1 \cdot P^{\text{ДВЗ}}}{Q \cdot m^{100\%}}$$

Для визначення ККД в інших режимах навантаження зручно апроксимувати координати отриманих трьох точок квадратичною залежністю:

$$\eta_i^{\text{ДВЗ}} = \eta_2^0 \left(\frac{P_i^{\text{ДВЗ}}}{P_{\text{НОМ}}^{\text{ДВЗ}}} \right)^2 + \eta_1^0 \left(\frac{P_i^{\text{ДВЗ}}}{P_{\text{НОМ}}^{\text{ДВЗ}}} \right), \quad (3.25)$$

де $\eta_i^{\text{ДВЗ}}$ – поточне значення ККД генератора з ДВЗ в i -годину, в.о.;

η_2^0 , η_1^0 – коефіцієнти апроксимації, в.о.

Для більшості генераторів з ДВЗ максимального значення коефіцієнт корисної дії досягає при завантаженні 75 %. При зменшенні навантаження ККД різко знижується. Тому з енергетичної та економічної точки зору найбільш доцільною є експлуатація ДВЗ при завантаженні не нижче 50 %.

З урахуванням викладеного запропонована наступна модель генератора з ДВЗ, яка дозволяє визначати витрату палива за будь-який інтервал його роботи.

Вихідними даним є:

- а) електрична потужність, яку необхідно виробити з допомогою генератора;
- б) залежність ККД від навантаження генератора.

Розрахунок витрати палива проводиться в наступній послідовності:

- а) визначення коефіцієнта корисної дії генератора з ДВЗ для заданого значення потужності навантаження в годинний інтервал i за формулою (3.25);

б) визначення витрати палива в годинний інтервал i для відомих значень ККД установки і потужності навантаження:

$$m_i^{\text{ДВЗ}} = \frac{P_{\text{СПОЖ } i}^{\text{ДВЗ}}}{Q \cdot \eta_i^{\text{ДВЗ}}}, \quad (3.26)$$

Таким чином рівняння 3.22-3.26 являють математичну модель двигуна внутрішнього згорання з електрогенератором як джерела електричної енергії.

3.1.4. Математична модель напівпровідникового перетворювача.

На даний момент в більшості вивчених робіт [51-57] інвертор в моделі системи характеризується значенням ККД. Звичайно це значення приймається постійним, рівним номінальному, яке надає виробник. Такий підхід не зовсім коректний, так як для будь-якого електричного пристрою значення його ККД змінюється в залежності від потоків енергії, які через нього проходять. Тому для коректного моделювання роботи інвертора в складі КЕЕС була розроблена математична модель, яка враховує зміну ККД приладу в залежності від навантаження.

З урахуванням основних характеристик інвертора, запропонована послідовність розрахунку параметрів приладу при синтезі структури перетворювача для заданої умови максимального значення ККД в номінальному режимі [102]:

а) визначення показника ефективності, який забезпечує заданий ККД:

$$K_{\text{еф}} = \frac{4\eta_{\text{НОМ}}}{(1 - \eta_{\text{НОМ}})^2}, \quad (3.27)$$

де $\eta_{\text{НОМ}}$ – величина ККД перетворювача для номінального режиму роботи.

б) розрахунок ККД η_{max} і потужності P_{max}^* в екстремальному режимі роботи (режим максимального навантаження):

$$\eta_{\text{екс}} = \frac{\sqrt{K_{\text{еф}} + 1} - 1}{\sqrt{K_{\text{еф}} + 1} + 1}; \quad (3.28)$$

$$P_{\text{мах}}^* = \frac{P_{\text{мах}}}{P_{\text{ном}}} \cdot (1 - \eta_{\text{екс}}^2), \quad (3.29)$$

де $K_{\text{еф}}$ – показник ефективності роботи перетворювача, який однозначно визначає максимум його ККД, який може бути отриманий в одному з режимів навантаження;

$P_{\text{мах}}$ – максимальна (паспортна) вихідна потужність перетворювача, кВт;

$P_{\text{ном}}$ – номінальна (паспортна) вихідна потужність перетворювача, кВт.

в) розрахунок коефіцієнта k , що залежить від величини відбору потужності від перетворювача:

$$k = 0,04 \cdot \frac{P_{\text{спож}}}{P_{\text{ном}}}, \quad (3.30)$$

де $P_{\text{спож}}$ – електрична потужність, яка віддається навантаженню через перетворювач, кВт;

$P_{\text{ном}}$ – номінальна (паспортна) вихідна потужність перетворювача, кВт.

г) розрахунок ККД перетворювача при перетворенні постійної напруги в змінну прямокутної форми:

$$\eta_i^{\text{прям}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{\text{еф}} \cdot k} + \frac{k}{0,5 - k + \sqrt{0,25 - k}}}. \quad (3.31)$$

Приведений в [102] алгоритм дозволяє спроектувати структуру перетворювача і визначити зміну його ККД в залежності від потоків енергії,

які протікають через пристрій. Проте ці формули справедливі лише для випадку перетворення постійної напруги в змінну прямокутної форми, що значно погіршує якість електричної енергії. Тому при розрахунку значень ККД перетворювача для режиму синусоїдальної напруги додатково визначаються втрати енергії в перетворювачі:

$$\Delta P^{\text{інв}} = U_{\text{ср}} \cdot I_{\text{ср}} + R^{\text{інв}} \cdot k_{\phi}^2 I_{\text{ср}}^2, \quad (3.32)$$

де $U_{\text{ср}}$, $I_{\text{ср}}$ – середнє значення напруги та струму;

$R^{\text{інв}}$ – власний активний опір інвертора;

k_{ϕ} – фактор форми перетвореної напруги, для напруги прямокутної форми

$k_{\phi} = 1$, для синусоїдальної напруги $k_{\phi} = 1,11$.

У випадку розрахунку кіл з великими струмами, основний вплив на втрати в перетворювачі чинить другий доданок (3.32). Тому при рівних значеннях $U_{\text{ср}}$, $I_{\text{ср}}$, $R^{\text{інв}}$ втрати для синусоїдального режиму зростають в $k_{\phi}^2 = 1,11^2 = 1,23$ раз. Таким чином, виражаючи ККД перетворювача як

$$\eta^{\text{інв}} = \frac{P_{\text{вих}}^{\text{інв}}}{P_{\text{вих}}^{\text{інв}} + \Delta P^{\text{інв}}}, \quad (3.33)$$

можна знайти величину його ККД при перетворенні в синусоїдальну напругу, використовуючи знайдені раніше значення ККД для випадку перетворення в прямокутну напругу і співвідношення $\Delta P_{\text{син}}^{\text{інв}} = 1,23 \cdot \Delta P_{\text{прям}}^{\text{інв}}$.

Математичний вираз для визначення значення ККД інвертора при перетворенні постійної напруги в змінну синусоїдальну напругу має вигляд:

$$\eta_i^{\text{інв}} = \frac{\eta_i^{\text{прям}}}{1,23 - 0,23 \cdot \eta_i^{\text{прям}}}, \quad (3.34)$$

Таким чином рівняння 3.27-3.43 являють математичну модель перетворювача електричної енергії.

3.2 Структурна схема САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС та алгоритм визначення вектора керування

На рис. 3.2. зображена структурна схема САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

На рис. 3.2:

КЕЕС – комбінована електроенергетична система;

ОК – об’єкт керування;

В – вимірювач енергетичних характеристик ВДЕ;

p_r – тиск газу в газгольдері біогазової установки;

u – швидкість вітру;

G – інтенсивність сонячного випромінювання;

$\underline{U}_c$ – напруга, яка підтримується в районній електричній мережі;

$\underline{S}_H = P_H + jQ_H$ – комплексна потужність навантаження;

$\underline{U}_2$ – комплекс напруги на шинах споживача;

$\underline{I}_2$ – комплекс струму в лінії;

$S_{H\text{вим}}$ – виміряне значення комплексної потужності навантаження;

$U_{2\text{вим}}$ – виміряне значення комплексу напруги на шинах споживача;

$I_{2\text{вим}}$ – виміряне значення комплексу струму в лінії;

$\xi = [U_{\text{ном}}, R_c, X_c, \zeta_1, \zeta_2, a_1, a_2, c_0]$ – вектор задаючих параметрів;

$\mathbf{P}_{\text{max}}^{\text{ВДЕ}} = [P_{\text{max}}^{\text{СЕС}}, P_{\text{max}}^{\text{ВЕС}}, P_{\text{max}}^{\text{БГЕ}}]$ – вектор максимальних значень потужності відновлюваних джерел енергії;

$\mathbf{K}_{\text{ген}}^{\text{opt}} = [K_{\text{СЕС}}^{\text{opt}}, K_{\text{ВЕС}}^{\text{opt}}, K_{\text{БГЕ}}^{\text{opt}}]$ – вектор оптимального керування що визначений регулятором (вихідний сигнал регулятора Р);

$\mathbf{P}_{\text{ген}}^{\text{opt}'} = [P_{\text{СЕС}}^{\text{opt}'}, P_{\text{ВЕС}}^{\text{opt}'}, P_{\text{БГЕ}}^{\text{opt}'}]$ – вектор значень потужностей ВДЕ, що задається виконавчим пристроєм;

1 – сонячна електростанція;

2 – вітрова електростанція;

3 – біогазова електростанція;

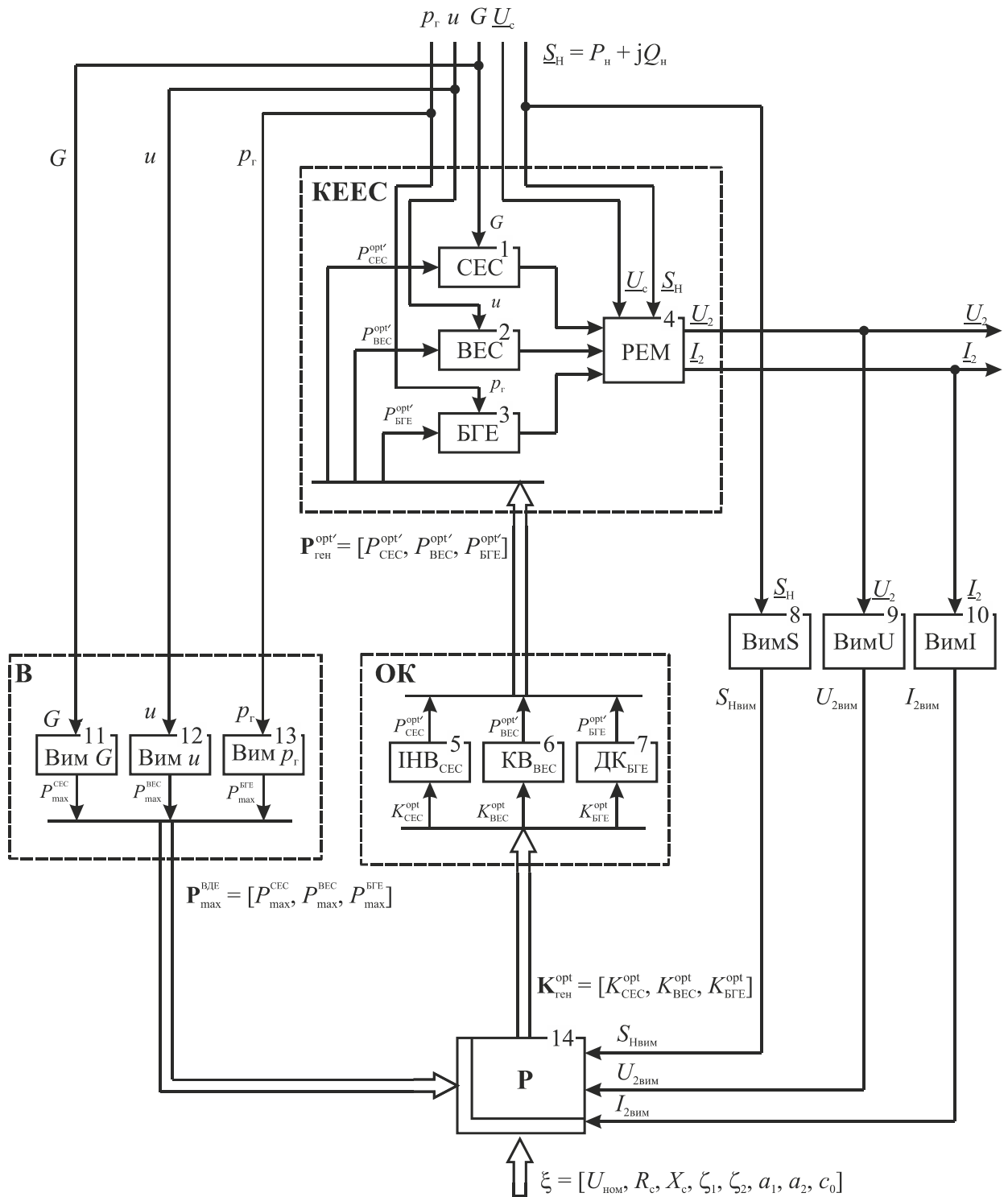


Рис. 3.2. Структурна схема САК генерацією
активної потужності ВДЕ в КЕЕС

4 – розподільна електрична мережа;

5 – інвертор сонячної електростанції;

- 6 – керований випрямляч вітрової електростанції;
- 7 – дросель-клапан біогазової електростанції;
- 8 – вимірювач потужності навантаження;
- 9 – вимірювач напруги на шинах споживачів;
- 10 – вимірювач струму в лінії;
- 11 – вимірювач інтенсивності сонячного випромінювання;
- 12 – вимірювач швидкості вітру;
- 13 – вимірювач тиску газу в газгольдері біогазової установки;
- 14 – регулятор, в якому відбувається визначення вектора керування.

На структурній схемі САК рис. 3.2 на вхід блоку 14 від вимірювачів енергетичних характеристик ВДЕ 11, 12, 13 надходить вектор $\mathbf{P}_{\max}^{\text{ВДЕ}} = [P_{\max}^{\text{СЕС}}, P_{\max}^{\text{ВЕС}}, P_{\max}^{\text{БГЕ}}]$ даних про максимально можливу в даний момент генерацію потужності установками ВДЕ. На основі вектора $\mathbf{P}_{\max}^{\text{ВДЕ}}$ та даних вимірювань значення потужності споживання $S_{\text{НВМ}}$, напруги на шинах споживачів $U_{2\text{ВМ}}$, струму в лінії $I_{2\text{ВМ}}$, в блоці 14 відбувається визначення вектору оптимального керування $\mathbf{K}_{\text{ген}}^{\text{opt}} = [K_{\text{СЕС}}^{\text{opt}}, K_{\text{ВЕС}}^{\text{opt}}, K_{\text{БГЕ}}^{\text{opt}}]$. Вектор $\mathbf{K}_{\text{ген}}^{\text{opt}}$ передається на інвертор СЕС, керований випрямляч ВЕС, та дросель-клапан БГЕ, які відповідно із власними технічними параметрами задають максимально близьку уставку потужності $\mathbf{P}_{\text{ген}}^{\text{opt}'} = [P_{\text{СЕС}}^{\text{opt}'}, P_{\text{ВЕС}}^{\text{opt}'}, P_{\text{БГЕ}}^{\text{opt}'}]$.

Алгоритм визначення вектора оптимального керування $\mathbf{K}_{\text{ген}}^{\text{opt}}$ рівнем генерації активної потужності ВДЕ в складі КЕЕС приведений на рис. 3.3. у вигляді блок-схеми.

На рис. 3.3:

2 – процедура зчитування даних про поточні параметри режиму роботи комбінованої електроенергетичної системи та максимально можливі значення потужності генерації установок з ВДЕ;

3 – процедура визначення напруги мережі U_c по відомим параметрам мережі та виміряним значенням потужності навантаження і струму в лінії;

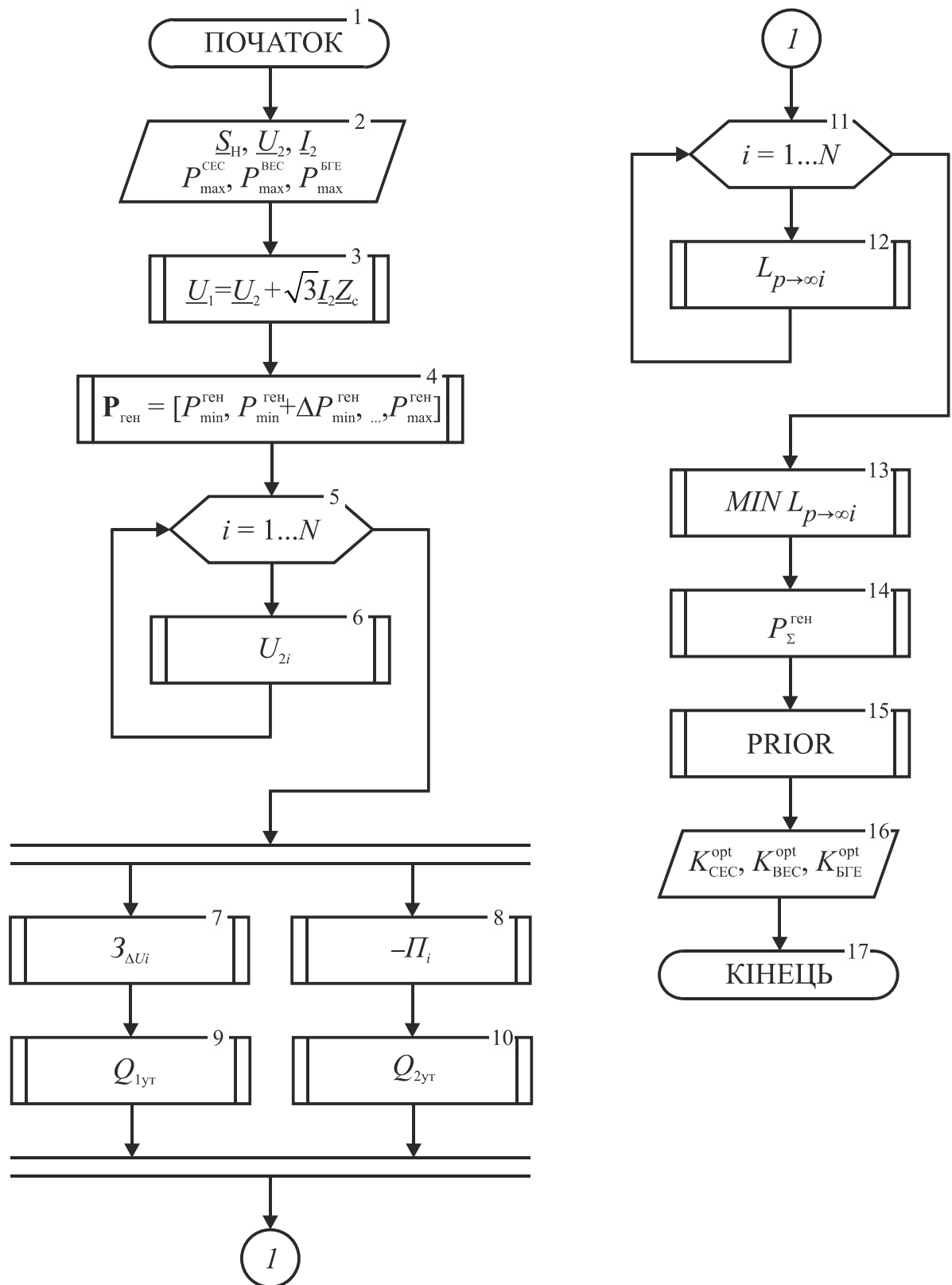


Рис. 3.3. Блок-схема алгоритму визначення оптимального вектора керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

- 4 – процедура дискретизації простору можливої потужності $\mathbf{P}_{\text{ген}} = [P_{\text{min}}^{\text{ген}}, P_{\text{min}}^{\text{ген}} + \Delta P_{\text{min}}^{\text{ген}} \dots P_{\text{max}}^{\text{ген}}]$ генерації;
- 6 – процедура розрахунку напруги U_2 на шинах споживача, при відповідних значеннях потужності генерації із простору $\mathbf{P}_{\text{ген}}$;
- 7 – процедура визначення критерію Q_1 ;
- 8 – процедура визначення критерію Q_2 ;
- 9 і 10 – процедури визначення координат утопічної точки $Q_{1\text{ут}}$ і $Q_{2\text{ут}}$, реалізуються методом повного перебору;
- 12 – процедура визначення за формулою (2.13) відстаней від елементів множини парето-оптимальних розв'язків до променя, що виходить з утопічної точки $Q_{\text{ут}} (Q_{1\text{ут}}, Q_{2\text{ут}})$ під кутом γ ;
- 13 – процедура пошуку мінімальної відстані від множини парето-оптимальних розв'язків до променя, що виходить з утопічної точки $Q_{\text{ут}} (Q_{1\text{ут}}, Q_{2\text{ут}})$ під кутом γ , реалізується методом повного перебору;
- 14 – процедура визначення оптимальної величини сумарної потужності генерації;
- 15 – процедура пріоритетного розподілу оптимальної величини сумарної потужності генерації між окремими видами ВДЕ та визначення оптимального вектора керування $\mathbf{P}_{\text{ген}}^{\text{opt}}$.
- 16 – процедура виводу оптимального вектора керування до передаючого пристрою.

Вектор оптимального керування передається на виконавчий пристрій, де у відповідності із заданим значенням уставки генерації відповідної установки з ВДЕ ініціюється найближче значення потужності генерації.

3.3 Комп'ютерна імітаційна модель САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

На рис. 3.4 представлена узагальнена комп'ютерна імітаційна модель САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

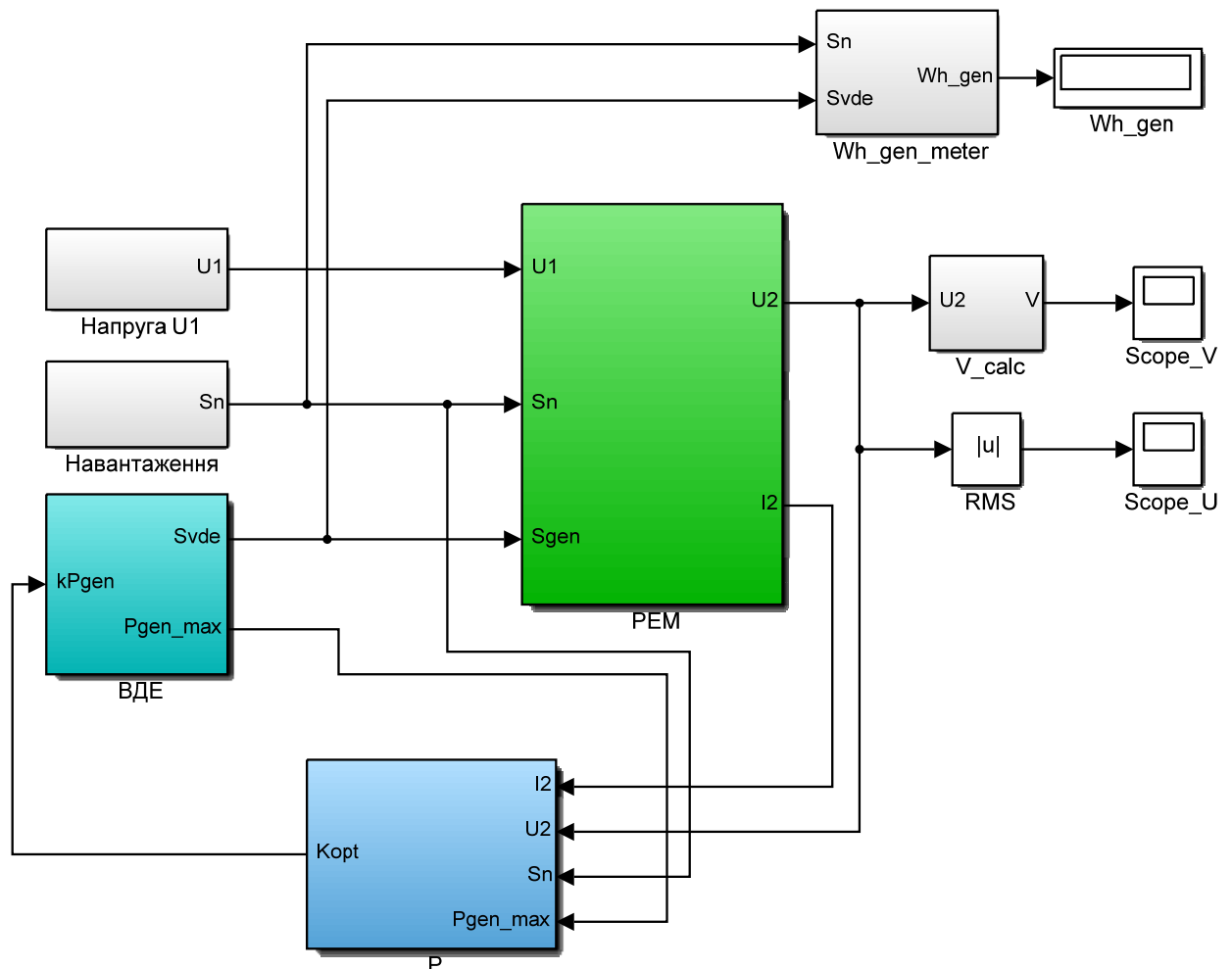


Рис. 3.4. Узагальнена комп'ютерна імітаційна модель САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС для Matlab Simulink

Узагальнена модель САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС включає:

- «Напруга U1» – блок моделювання величини напруги РЕМ;
- «Навантаження» – блок моделювання навантаження споживачів;
- «ВДЕ» – блок моделювання роботи установок ВДЕ;
- «РЕМ» – блок моделювання режиму роботи РЕМ;

- «P» – блок моделювання роботи регулятора системи автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ;
- «Wh_gen_meter» – блок розрахунку згенерованої електричної енергії;
- «V_calc» – блок розрахунку відхилення напруги на шині споживача;
- «RMS» – блок розрахунку діючого значення напруги на шині споживача;

Модель блоку навантаження для Matlab Simulink приведена на рис. 3.5. та складається з таких блоків:

- Pn – блок зчитування графіка активної потужності навантаження;
- Pn_nom – блок зчитування номінального значення активної потужності навантаження;
- «Noise Pn» – блок зашумлення споживання активної потужності;
- Qn – блок зчитування графіка реактивної потужності навантаження;
- Qn_nom – блок зчитування номінального значення реактивної потужності навантаження;
- «Noise Qn» – блок зашумлення споживання реактивної потужності;
- «Complex Sn» – блок формування комплексної потужності навантаження.

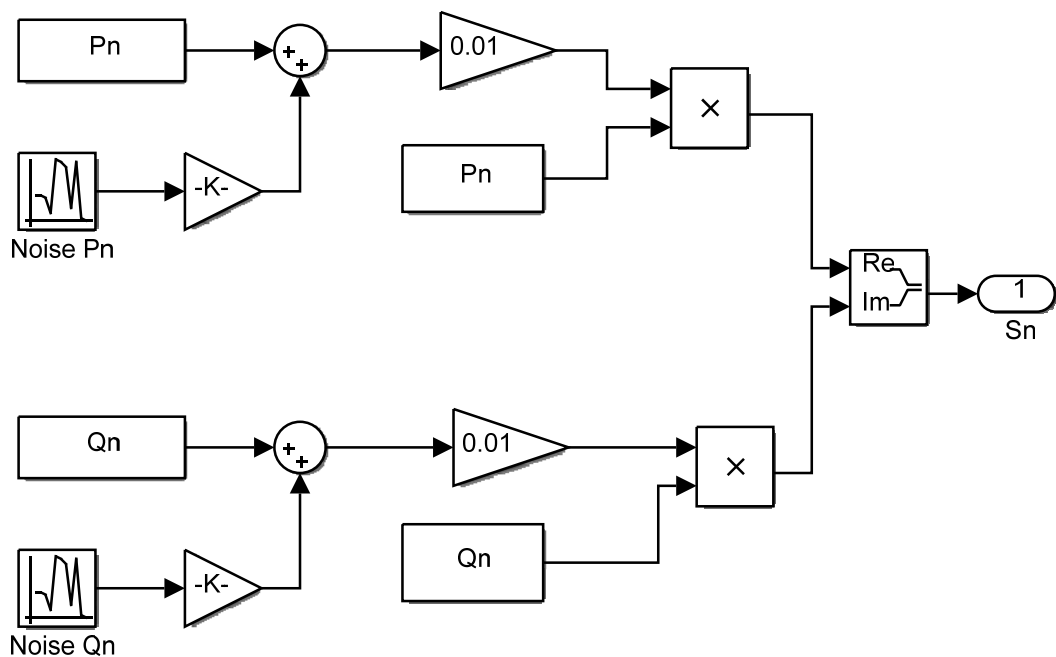


Рис. 3.5. Модель блоку навантаження для Matlab Simulink

Модель блоку роботи установок з ВДЕ для Matlab Simulink приведений на рис. 3.6.

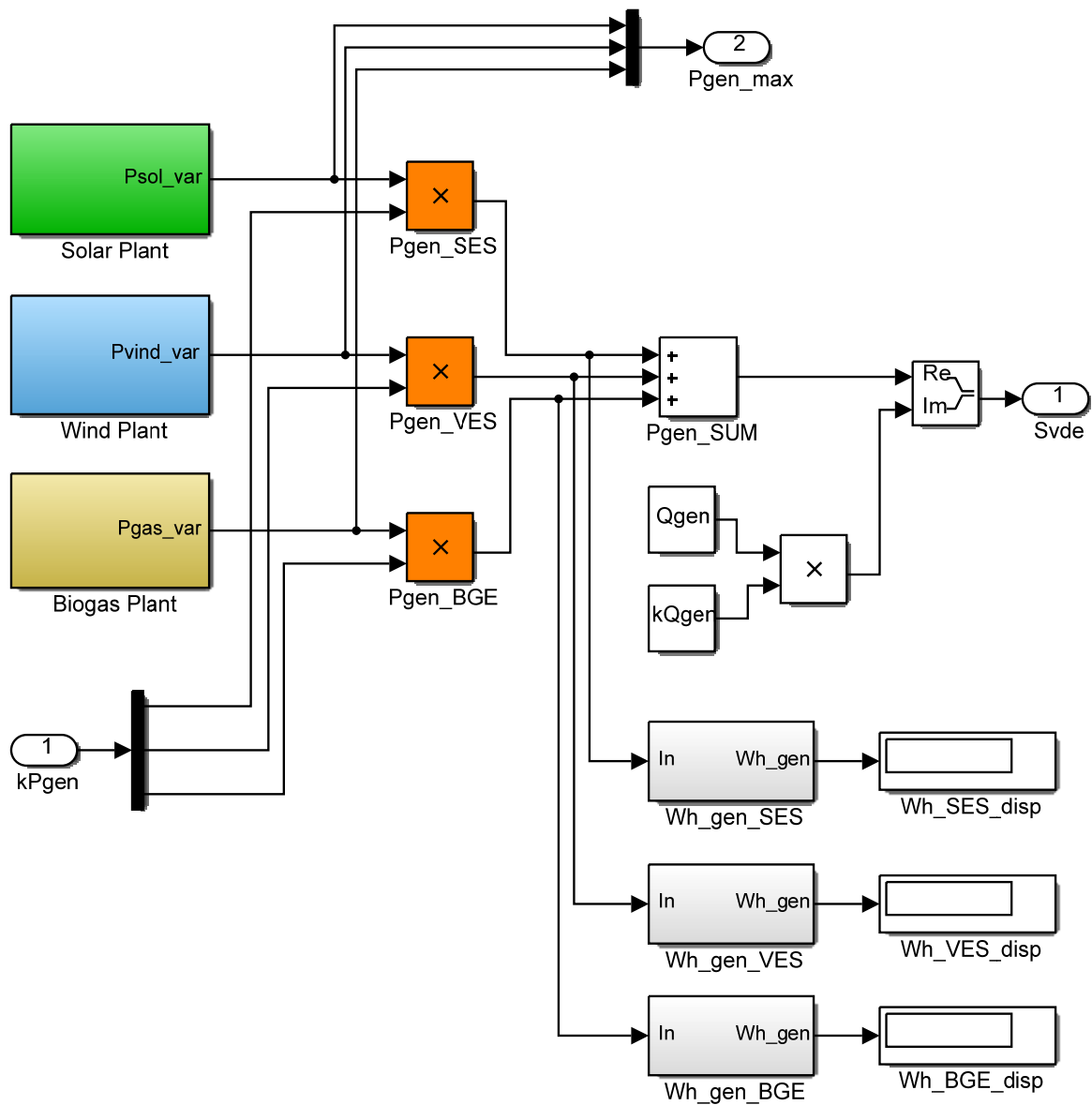


Рис. 3.6. Модель блоку роботи ВДЕ для Matlab Simulink

Модель блоку роботи установок ВДЕ складається з таких блоків

—«Solar Plant» – блок моделювання генерації активної потужності СЕС, в основу якого покладено співвідношення 3.1-3.12;

—«Wind Plant» – блок моделювання генерації активної потужності ВЕС, в основу якого покладено співвідношення 3.13-3.21;

- «Biogas Plant» – блок моделювання генерації активної потужності БГЕ, в основу якого покладені співвідношення 3.22-3.26;
- «Wh_gen_SES» – блок визначення генерації активної потужності сонячною електростанцією;
- «Wh_gen_VES» – блок визначення генерації активної потужності вітровою електростанцією;
- «Wh_gen_BGE» – блок визначення генерації активної потужності біогазовою електростанцією;
- Qgen – блок зчитування номінального значення реактивної потужності ВДЕ;
- kQgen – блок зчитування уставки коефіцієнта генерації реактивної потужності ВДЕ;
- «Complex Svde» – блок формування комплексної потужності ВДЕ.

Модель блоку розрахунку режиму роботи PEM для Matlab Simulink приведений на рис. 3.7.

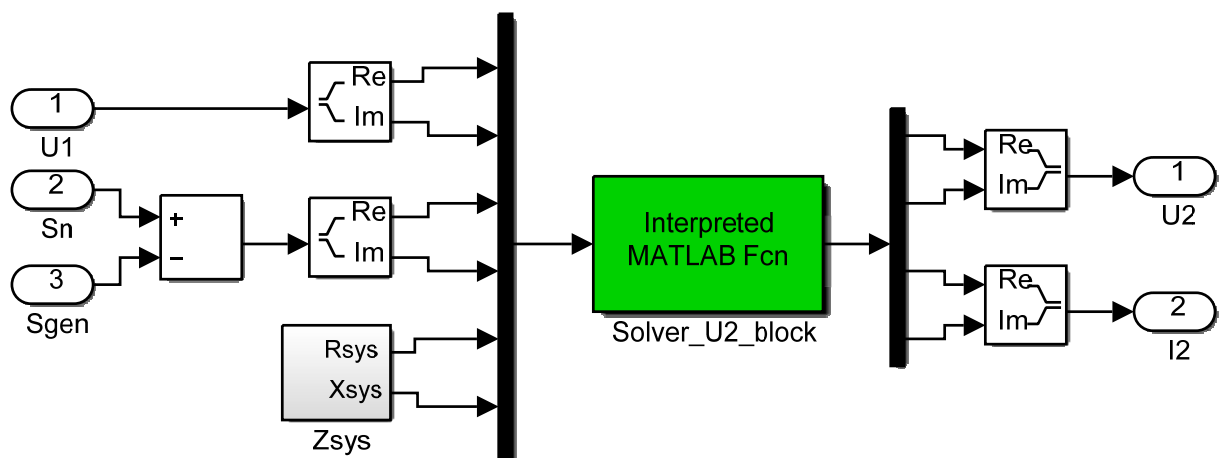


Рис. 3.7. Модель блоку розрахунку режиму роботи PEM для Matlab Simulink

Модель блоку розрахунку режиму роботи PEM складається з таких блоків:

- «Zsys» – блок зчитування даних про опори елементів PEM;

- «Solver_U2_block» – блок рішення нелінійних рівнянь для визначення напруги U_2 на шинах споживача та струму I_2 в лінії;
- «Complex U2» – блок формування комплексу напруги U_2 .
- «Complex I2» – блок формування комплексу струму I_2 .

Модель блоку автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС для Matlab Simulink приведена на рис. 3.8.

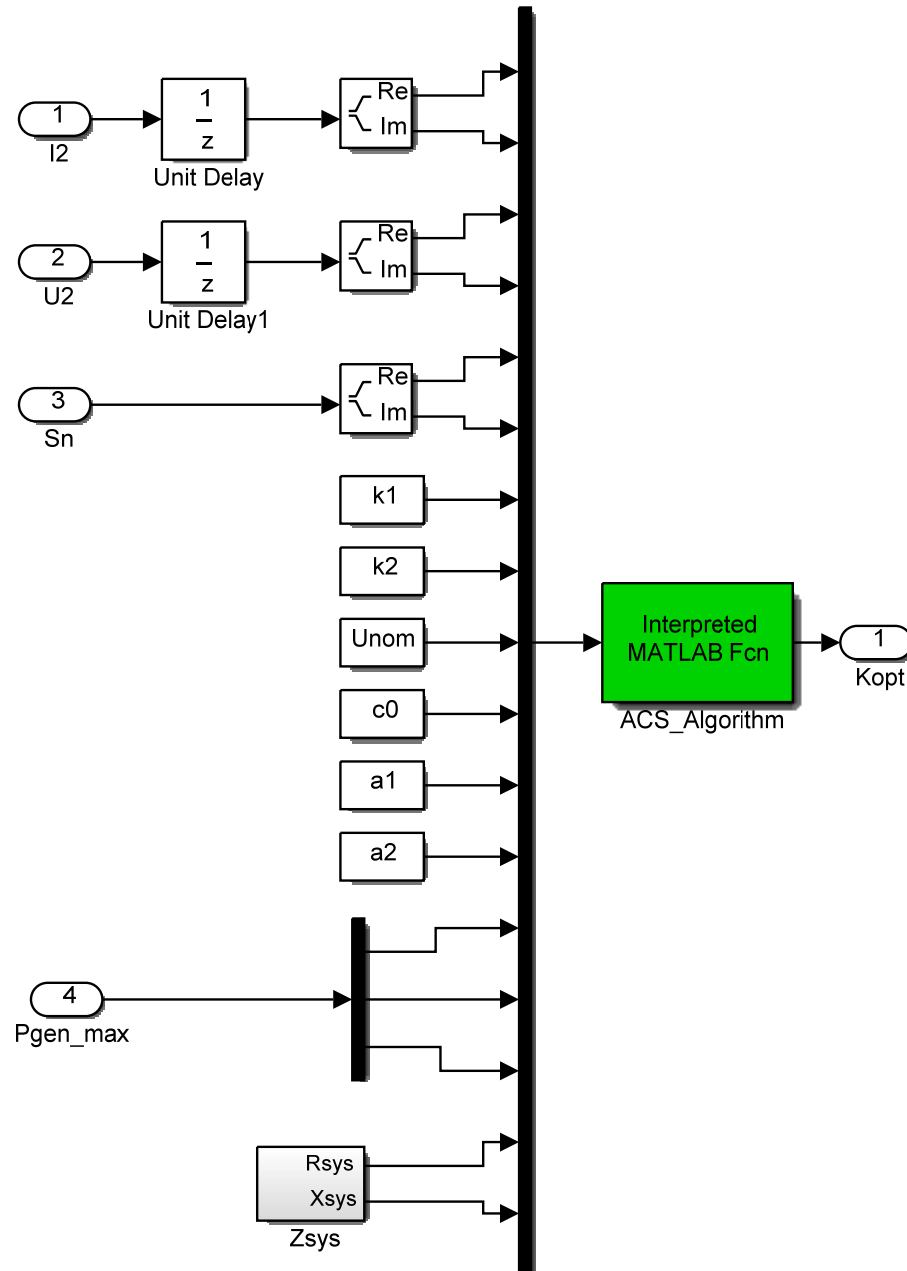


Рис. 3.8. Модель блоку автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС для Matlab Simulink

Модель блоку автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС складається з таких блоків:

- k1 – блок зчитування значення коефіцієнта ζ_1 ;
- k2 – блок зчитування значення коефіцієнта ζ_2 ;
- Unom – блок зчитування значення номінальної напруги мережі $U_{\text{ном}}$;
- c0 – блок зчитування значення коефіцієнта c_0 ;
- a1, a2 – блоки зчитування значень коефіцієнтів a_1 та a_2 ;
- «Zsys» – блок зчитування даних про опори елементів РЕМ;
- «ACS_Algorithm» – блок реалізації алгоритму визначення вектора оптимального керування;

Модель блоку розрахунку відхилення напруги на шинах споживачів для Matlab Simulink приведена на рис. 3.9. і складається з таких блоків:

- |u| – блок розрахунку модуля напруги на шинах споживача по комплексу напруги U_2 ;
- Unom – блок зчитування значення номінальної напруги мережі $U_{\text{ном}}$;
- 5 та мінус 5 – блоки задачі нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги.

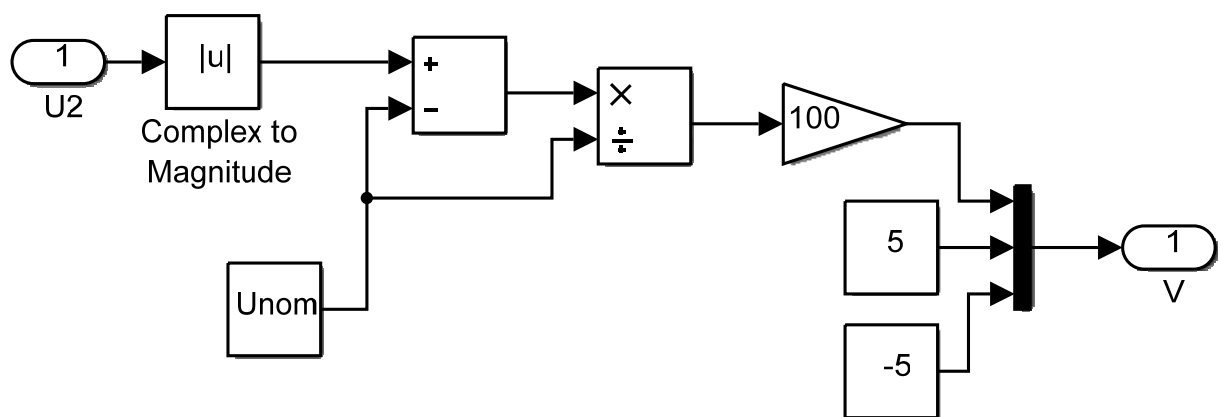


Рис. 3.9. Блок розрахунку відхилення напруги ΔU для Matlab Simulink

Модель блоку обліку електроенергії для Matlab Simulink приведена на рис. 3.10. і складається з таких блоків:

- $\text{Re}(u)$ – блок визначення активної потужності по значенню комплексної потужності (для потужностей навантаження та генерації ВДЕ);
- «Saturation» – блок інтеграції потужності на поточному кроці моделювання;
- «W_to_kW» – блок переводу потужності із Вт в кВт;
- «Discrete-Time Integrator» – блок інтеграції з дискретним часом.

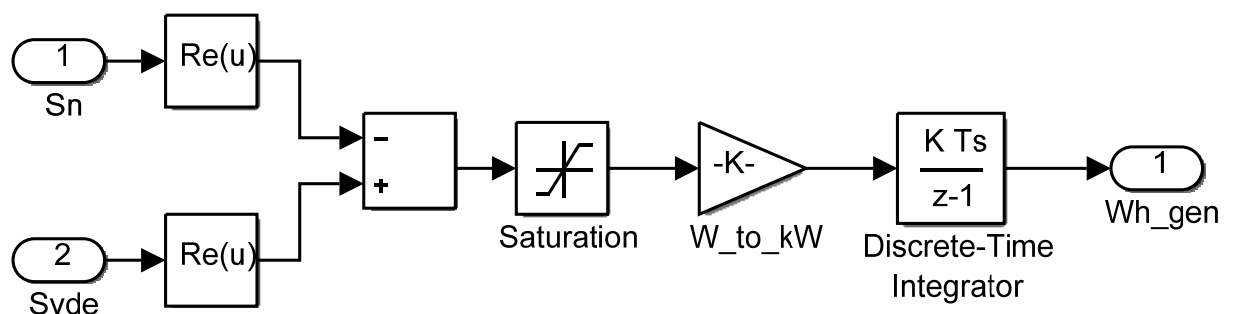


Рис. 3.10. Блок обліку електроенергії для Matlab Simulink

Розроблена модель САК для роботи потребує вводу даних про параметри режиму роботи КЕЕС з ВДЕ, а саме напругу на шинах споживача, споживання електричної енергії навантаженням, про максимально можливу потужність генерації установками з ВДЕ, номінальну напругу мережі та параметри елементів системи електропостачання (активні та реактивні опори системи, трансформатора, лінії).

Розроблена модель може бути застосована для математичного моделювання роботи САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

3.4 Дослідження стійкості САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

Розроблена САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС належить до класу нелінійних систем. Відтак застосування традиційних алгебраїчних або частотних критеріїв дослідження стійкості до таких САК є недоцільним.

Дослідження стійкості САК такого типу найбільш доцільно проводити шляхом аналізу перехідних процесів: у випадку стійкої САК перехідні процеси матимуть затухаючий характер.

З метою отримання перехідної характеристики $h(t)$ необхідно на вхід системи подати одиничний ступінчатий сигнал при нульових початкових умовах, який можна записати у вигляді:

$$1(t) = \begin{cases} 1, t \geq 0; \\ 0, t < 0. \end{cases} \quad (3.35)$$

Перехідну характеристику розробленої САК найдоцільніше отримати за допомогою комп'ютерного моделювання. Для цього необхідно скористатися розробленою комп'ютерною моделлю САК.

Графік сигналу ступінчастого збурення, що подається на вхід САК наведений на рис. 3.11.

Даний графік відповідає режиму роботи КЕЕС, за якого в момент часу 1 с рівень електричного навантаження ступінчато зменшується від максимального значення (140 кВт) до нуля.

Графіки перехідних процесів, що протікають в розробленій САК при дії ступінчастого збурення наведено на рис. 3.12 – 3.15

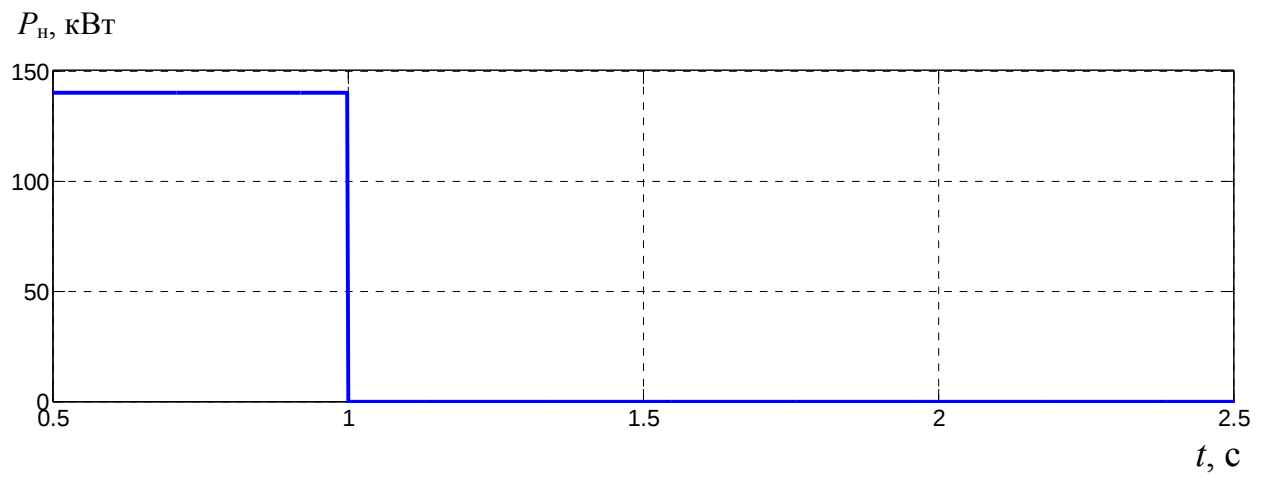


Рис. 3.11. Графік сигналу ступінчастого збурення

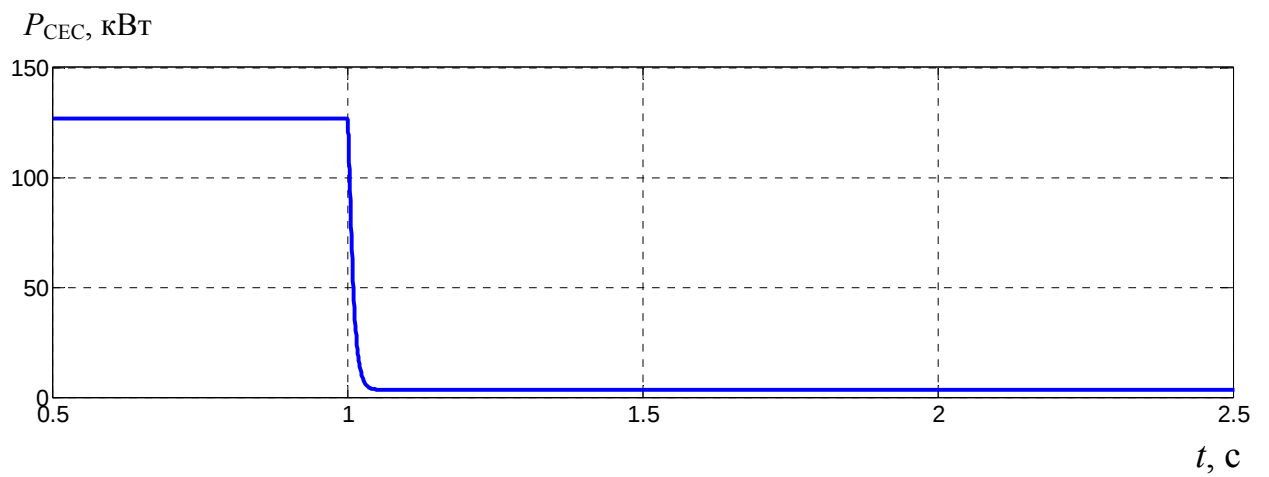


Рис. 3.12. Графік перехідного процесу рівня генерації активної потужності сонячної електростанції

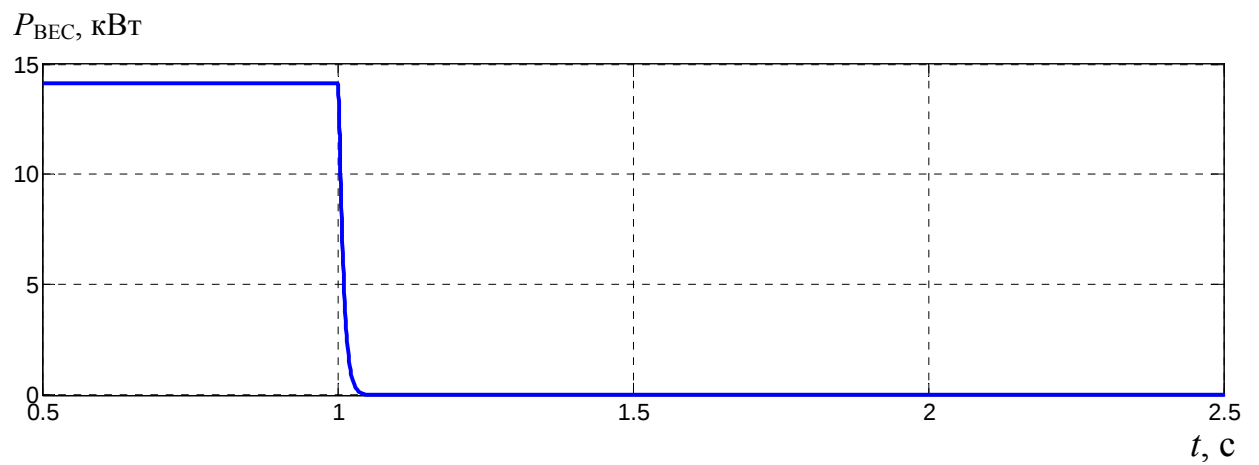


Рис. 3.13. Графік перехідного процесу рівня генерації активної потужності вітрової електростанції

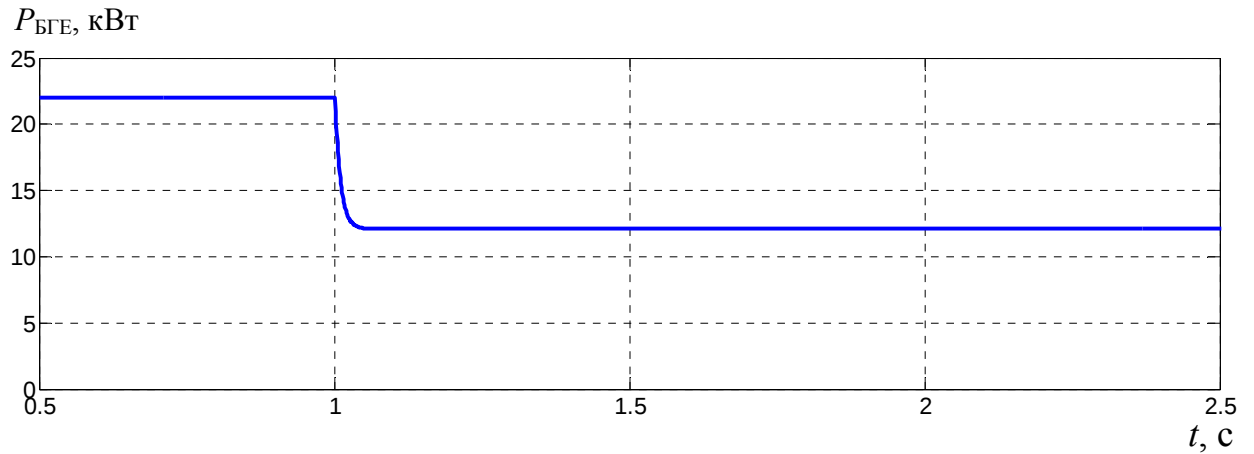


Рис. 3.14. Графік переходного процесу рівня генерації активної потужності біогазової електростанції

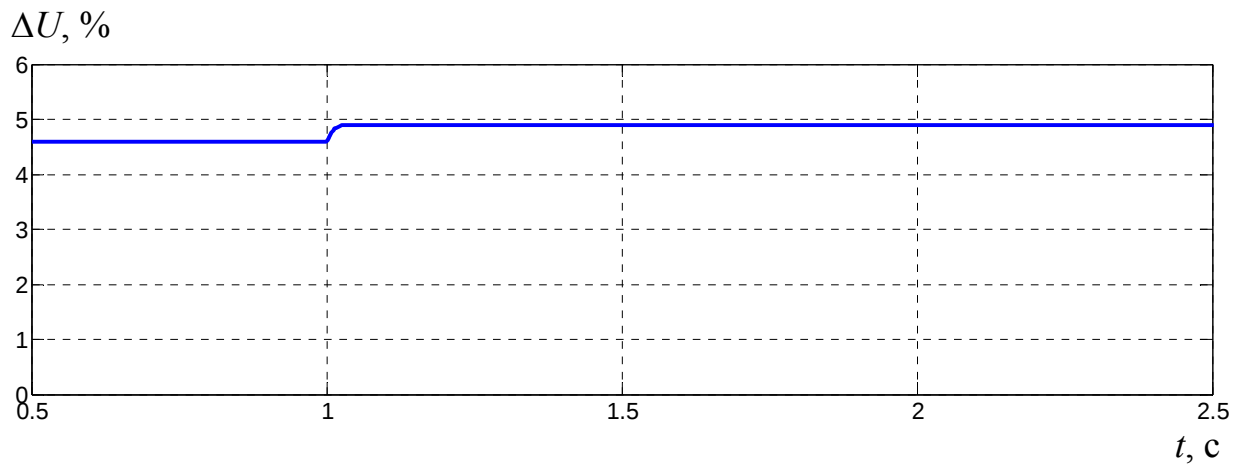


Рис. 3.15. Графік переходного процесу усталеного відхилення напруги на затискачах споживачів

Аналіз графіків, що наведені на рис. 3.12 – 3.15 показав, що перехідний процес для кожного з випадків має аперіодичний характер. З цього можна зробити висновок, що розроблена в роботі САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС задовольняє вимогам стійкості.

3.5 Комп'ютерне моделювання роботи САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

3.5.1 Технологія комп'ютерного моделювання, опис базової моделі.

Для визначення ефекту від розв'язку задачі керування (2.1) скористаємося розробленою в даному розділі роботи комп'ютерною імітаційною моделлю САК. В якості вихідних даних для моделювання були використані дані про електроспоживання сільськогосподарських підприємств зі звіту [103]. Дані про інтенсивність сонячного випромінювання, швидкість вітру взяті за річний період (2017 рік) [104, 105] для метеорологічних умов м. Кропивницький за географічними координатами метеостанції 48.54°Пн. Ш., 32.29°Сх. Д.В, 170м над рівнем моря, висота установки анемометра над землею 10 м з урахуванням рекомендацій [79, 85].

В якості базової моделі для порівняння [82] була обрана модель САК, яка здійснює таке керування рівнем генерації активної потужності ВДЕ в КЕЕС, при якому відхилення напруги ΔU на шинах споживача не перевищує нормально допустимого значення 5%.

Комп'ютерне моделювання роботи САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС полягає в наступному. Для кожного вимірювання параметрів режиму визначається вектор керування та параметри режиму, що встановлюється для трьох випадків:

- при відсутності керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС (в РЕМ генерується максимальна потужність);
- при такому керуванні генерацією активної потужності в КЕЕС з ВДЕ базової моделі САК, що обмежує значення усталеного відхилення напруги ΔU на шинах споживача верхнім значенням, що складає 5%;
- при використанні в САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС розробленої в роботі моделі блоку керування.

Розроблена комп'ютерна модель дозволяє розраховувати та запам'ятовувати параметри режиму роботи, потужності генерації і

споживання, напруги та відхилення напруги на шинах споживача, енергію споживання навантаженням та генерації ВДЕ. Це дозволяє візуалізувати результати розрахунків а також провести статистичну обробку для відхилення напруги на шинах споживача.

Для проведення моделювання було взято масив добових даних для швидкості вітру, інтенсивності сонячного випромінювання, споживання активної та реактивної потужності навантаженням з джерел [103-105].

3.5.2 Результати комп'ютерного моделювання роботи САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС. Для визначення ефекту від застосування розв'язку задачі керування (2.1) було проведене моделювання роботи розподільної мережі до якої підключена комбінована електроенергетична система з відновлюваними джерелами енергії для таких випадків: при відсутності керування генерацією активної потужності, для базової моделі при такому керуванні генерацією активної потужності, що обмежує відхилення напруги на шинах споживачів значенням 5%; при розробленому оптимальному керуванні генерацією активної потужності.

Статистична обробка результатів моделювання полягала у визначенні інтегральної ймовірності потрапляння значення усталеного відхилення напруги ΔU на шинах споживачів у нормально допустимі межі

$$P(\Delta U_{\min} \leq \Delta U \leq \Delta U_{\max}) = \frac{N_{\text{доп}}}{N}, \quad (3.35)$$

де P – інтегральна ймовірність потрапляння величини відхилення ΔU в діапазон значень $\Delta U_{\min} \leq \Delta U \leq \Delta U_{\max}$;

$N_{\text{доп}}$ – кількість значень величини ΔU , що входять в діапазон допустимих значень;

N – загальна кількість вимірювань величини ΔU .

Результати комп'ютерного моделювання роботи САК для випадку відсутності керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС приведені на рис. 3.16 – 3.21.

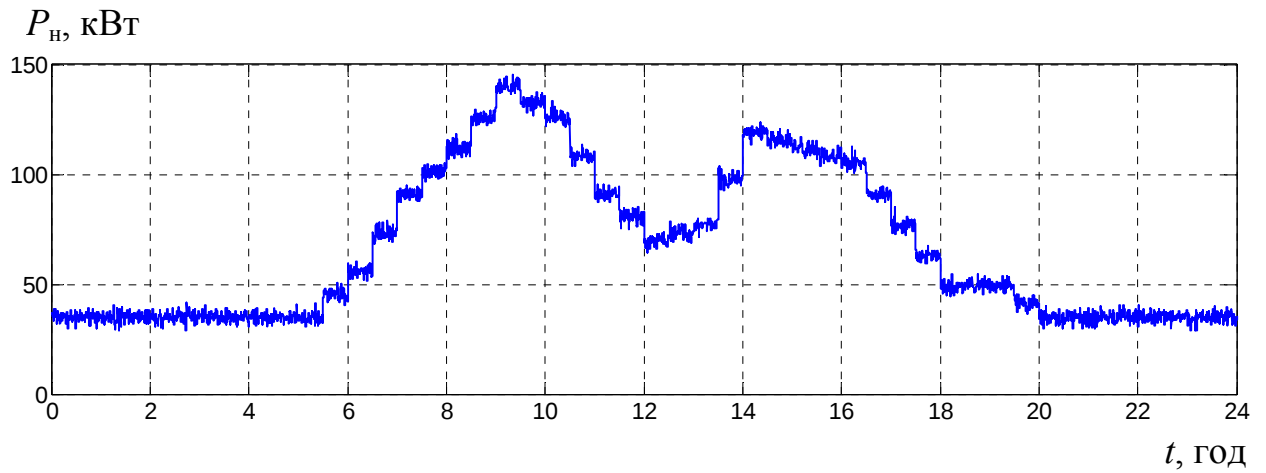


Рис 3.16. Графік споживання активної потужності навантаженням

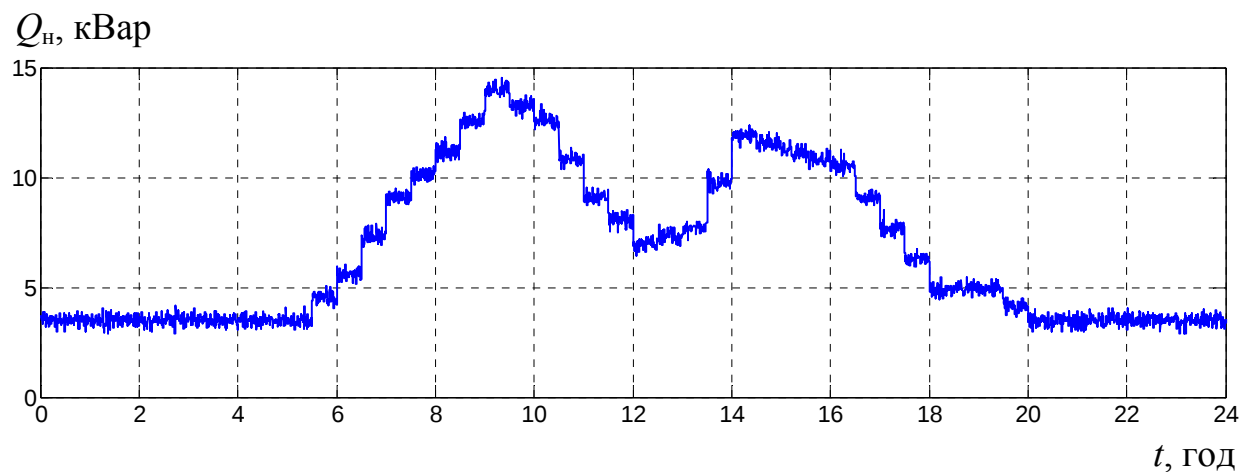


Рис 3.17. Графік споживання реактивної потужності навантаженням

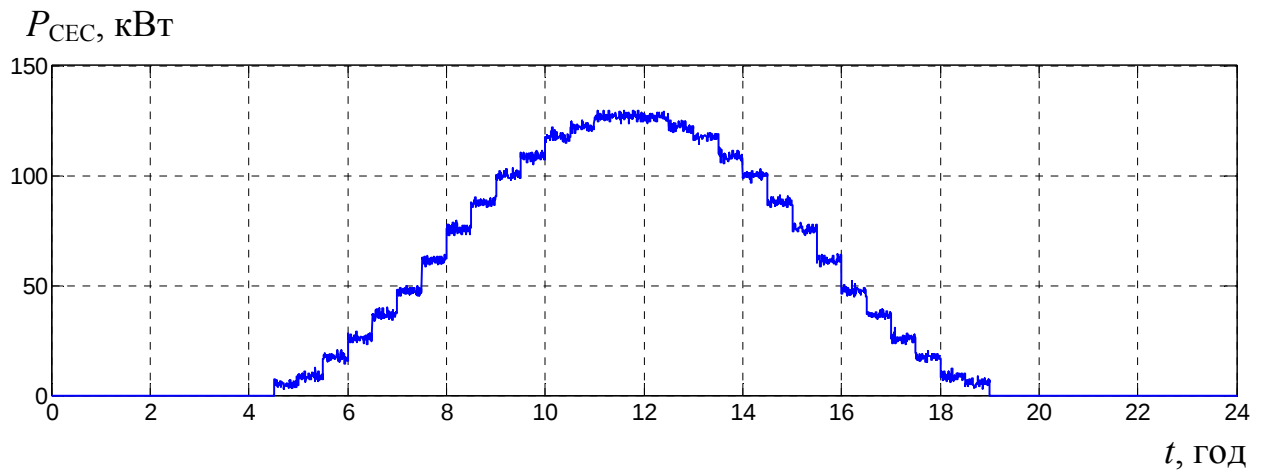


Рис 3.18. Графік видачі активної потужності СЕС без керування рівнем генерації активної потужності установок з ВДЕ

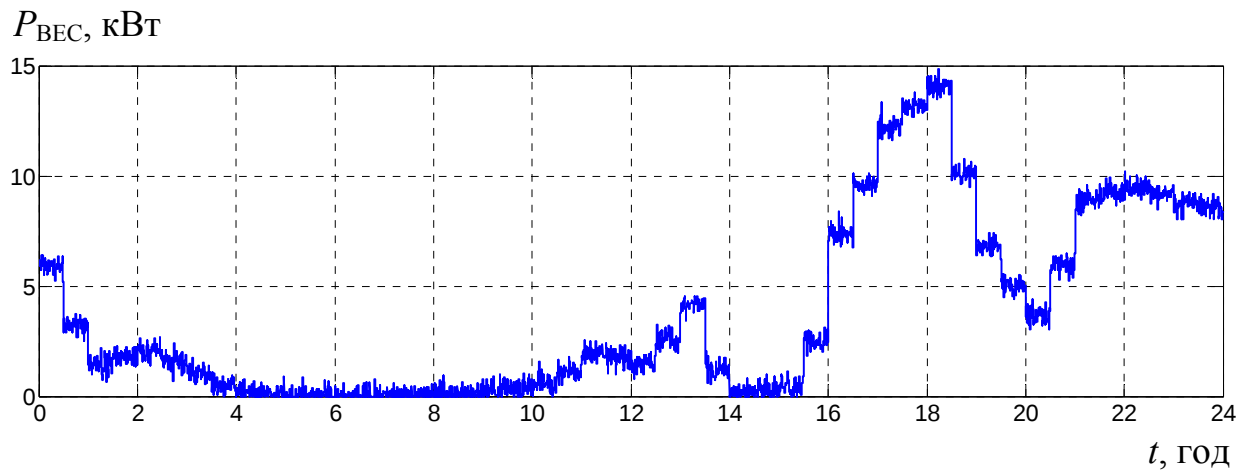


Рис 3.19. Графік видачі активної потужності ВЕС без керування рівнем генерації активної потужності установок з ВДЕ

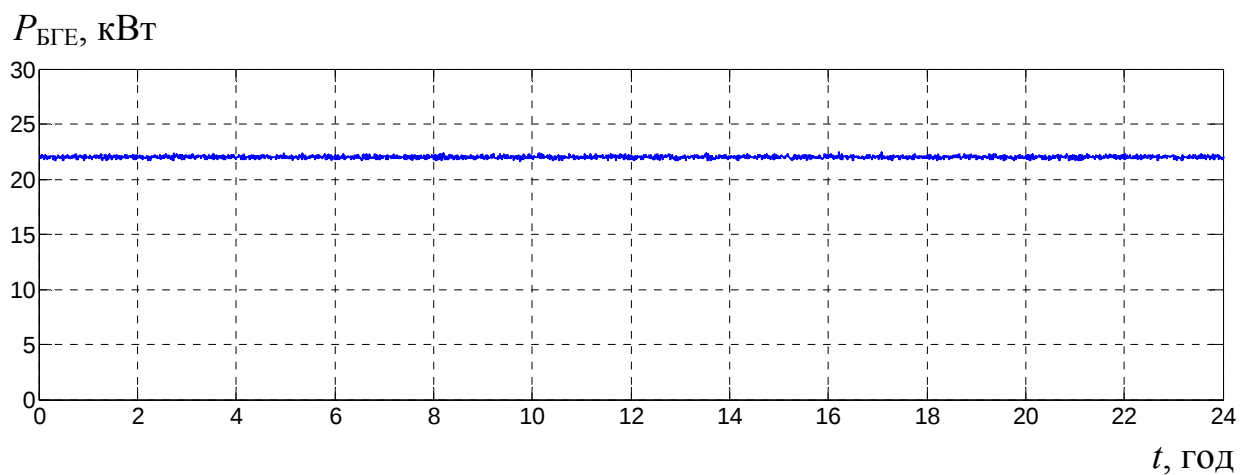


Рис 3.20. Графік видачі активної потужності БГЕ без керування рівнем генерації активної потужності установок з ВДЕ

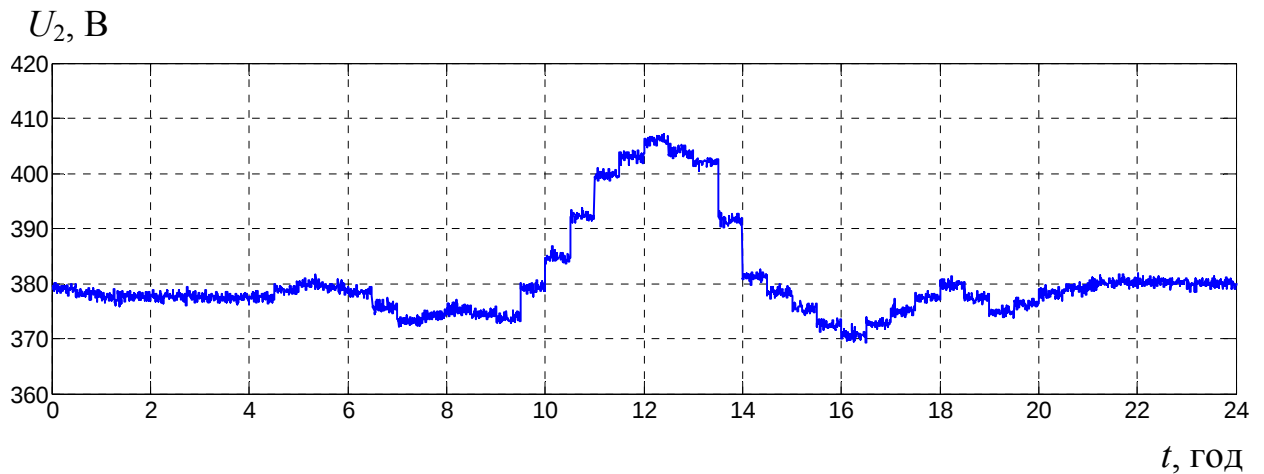


Рис 3.21. Графік напруги на шинах споживача без керування рівнем генерації активної потужності установок з ВДЕ

Результати комп'ютерного моделювання роботи САК базової моделі, тобто з таким керуванням генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС, при якому забезпечується обмеження відхилення напруги на шинах електроспоживачів значенням 5%) приведені на рис. 3.22 – 3.25.

Результати комп'ютерного моделювання роботи розробленої САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС приведені на рис. 3.26 – 3.32.

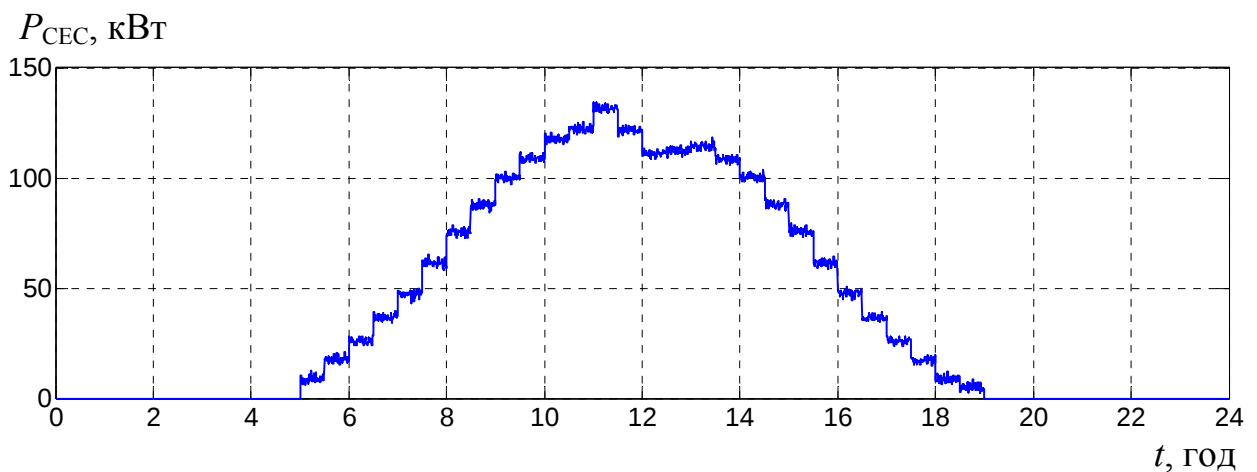


Рис 3.22. Графік потужності генерації СЕС за умови роботи базової САК при обмеженні відхилення напруги значенням 5%

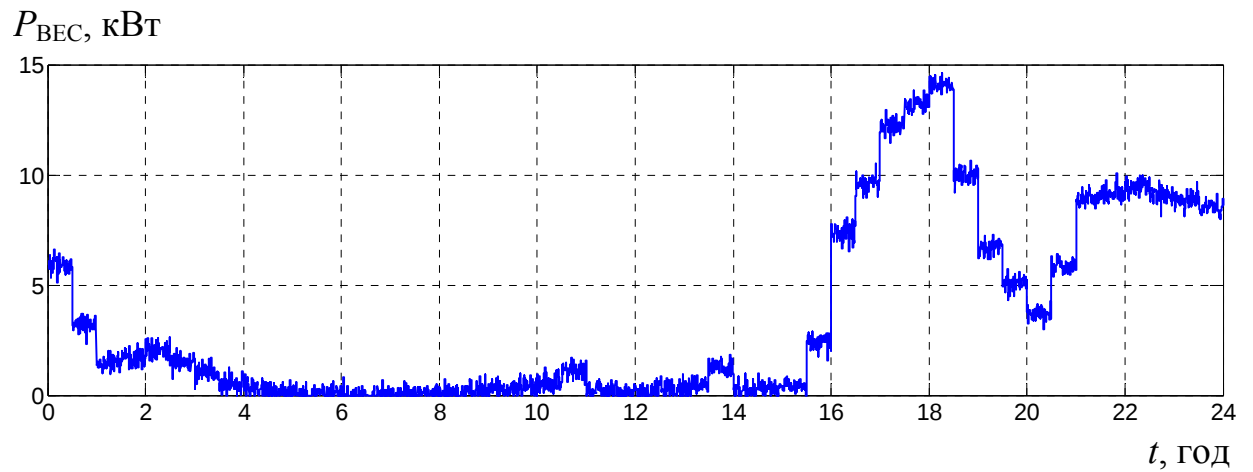


Рис 3.23. Графік потужності генерації ВЕС за умови роботи базової САК при обмеженні відхилення напруги значенням 5%

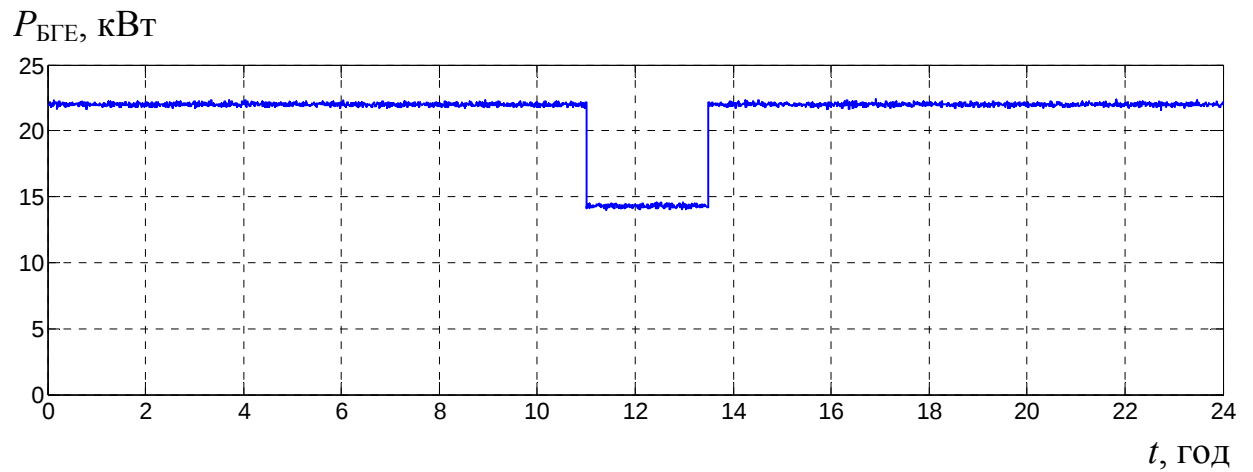


Рис 3.24. Графік потужності генерації БГЕ за умови роботи базової САК при обмеженні відхилення напруги значенням 5%

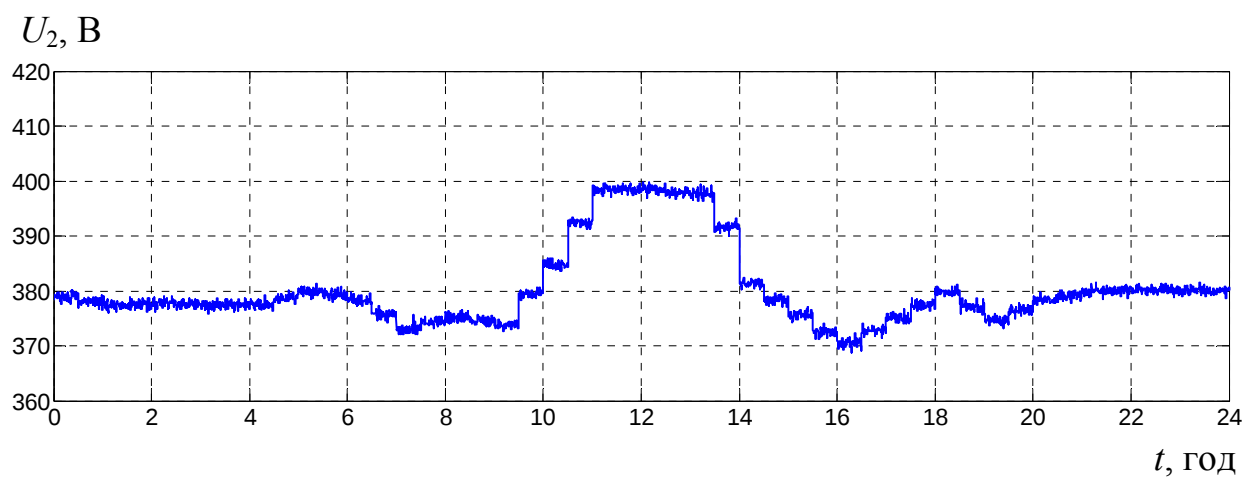


Рис 3.25. Графік напруги на шинах споживача за умови роботи базової САК при обмеженні відхилення напруги значенням 5%

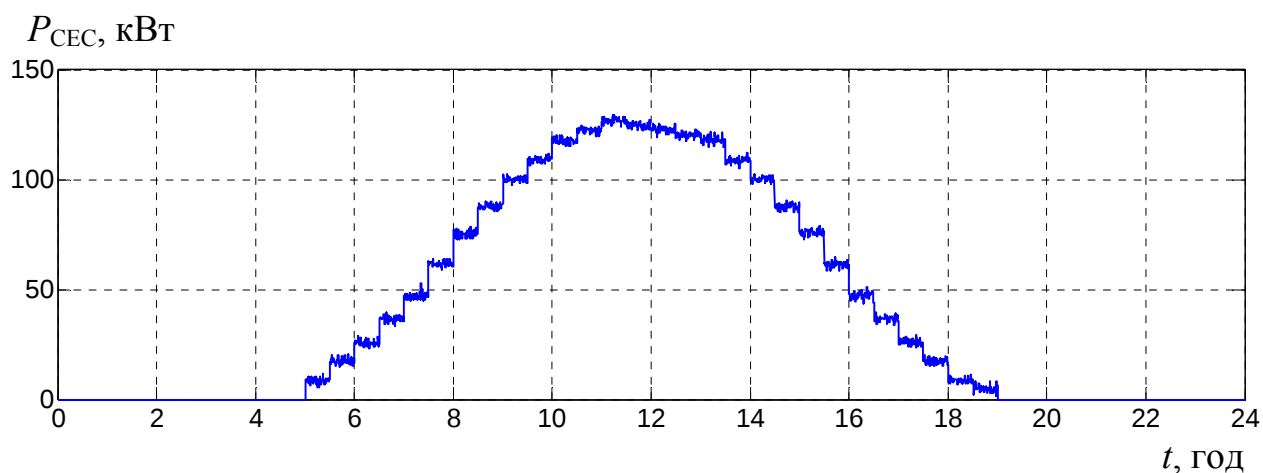


Рис 3.26 Графік потужності генерації СЕС при автоматичному керуванні генерацією активної потужності розробленою САК

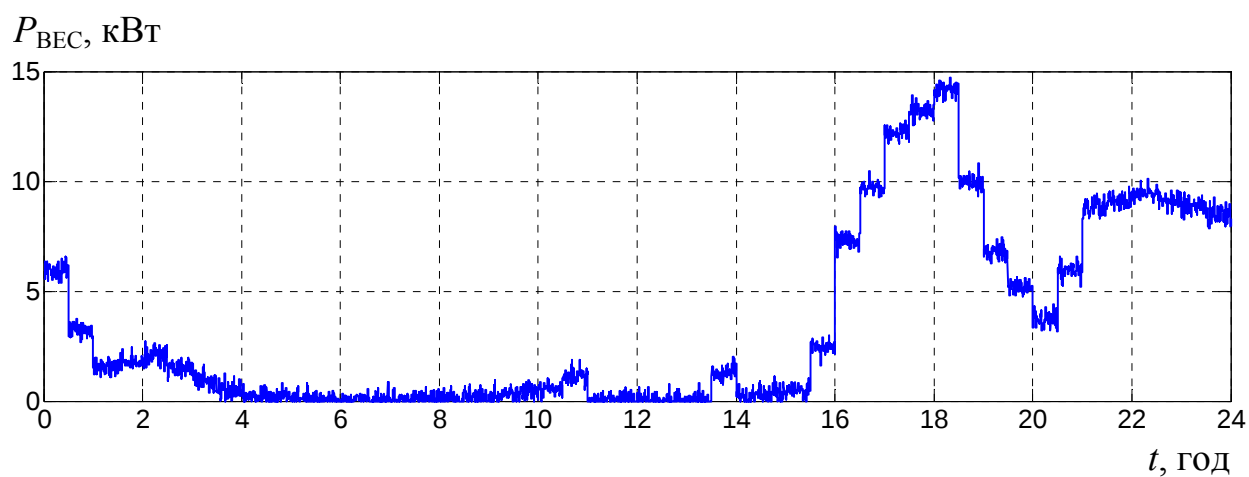


Рис 3.27. Графік потужності генерації ВЕС при автоматичному керуванні генерацією активної потужності розробленою САК

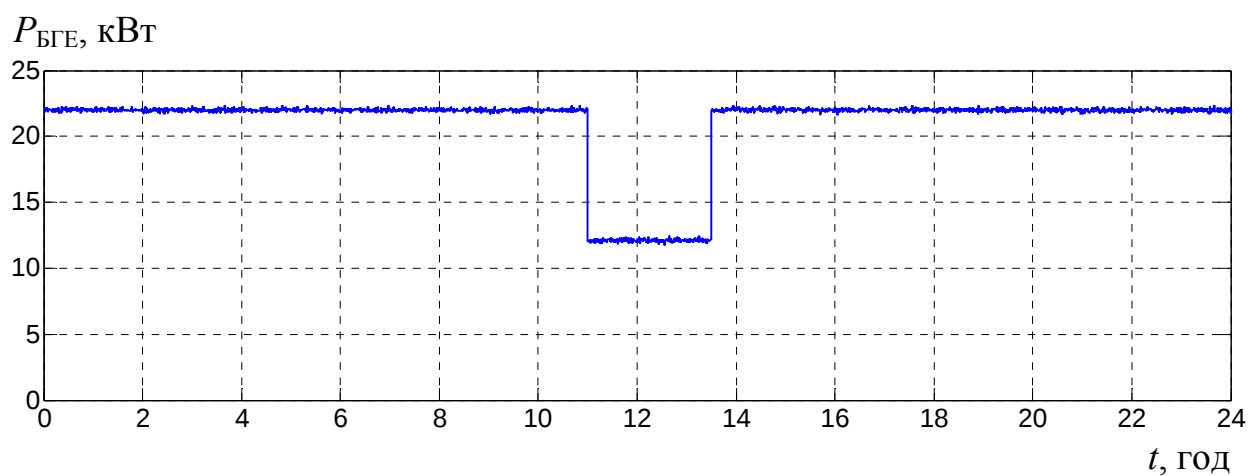


Рис 3.28. Графік потужності генерації БГЕ при автоматичному керуванні генерацією активної потужності розробленою САК

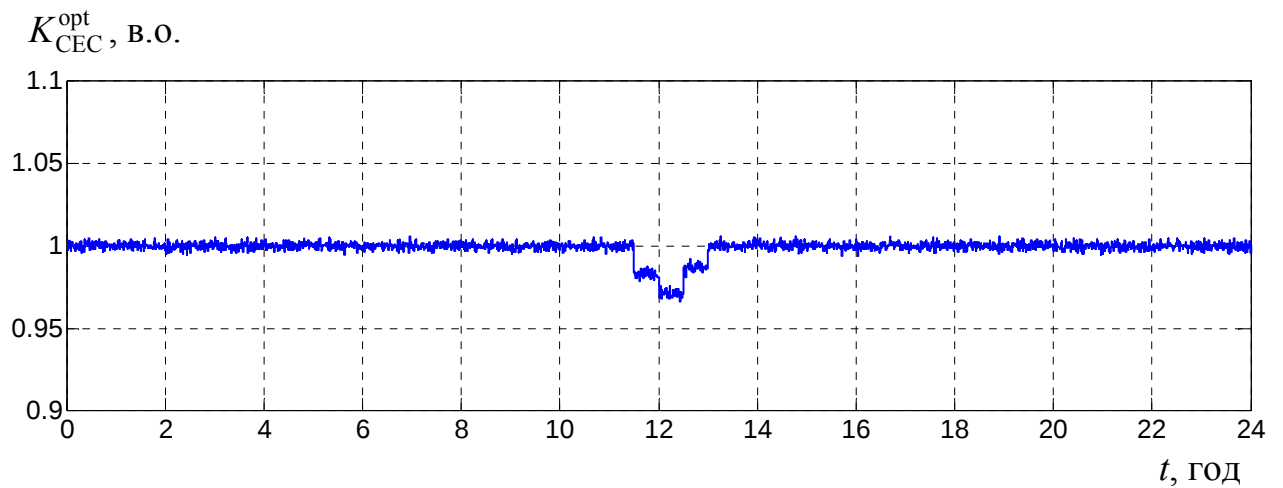


Рис 3.29. Графік коефіцієнта $K_{\text{СЕС}}^{\text{opt}}$ регулювання потужності СЕС при автоматичному керуванні генерацією активної потужності розробленою САК

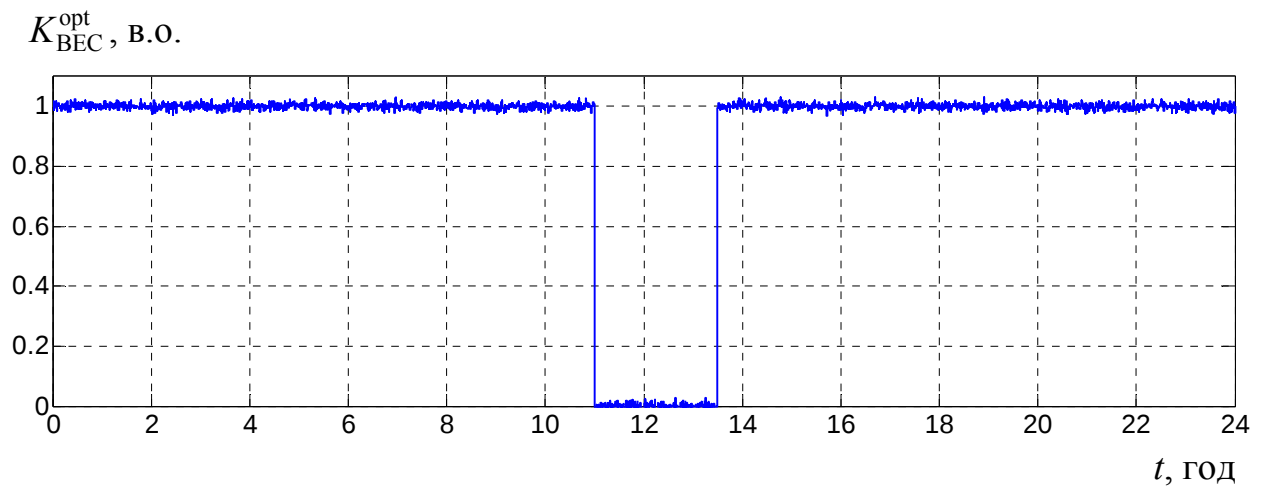


Рис 3.30. Графік коефіцієнта $K_{\text{ВЕС}}^{\text{opt}}$ регулювання потужності ВЕС при автоматичному керуванні генерацією активної потужності розробленою САК

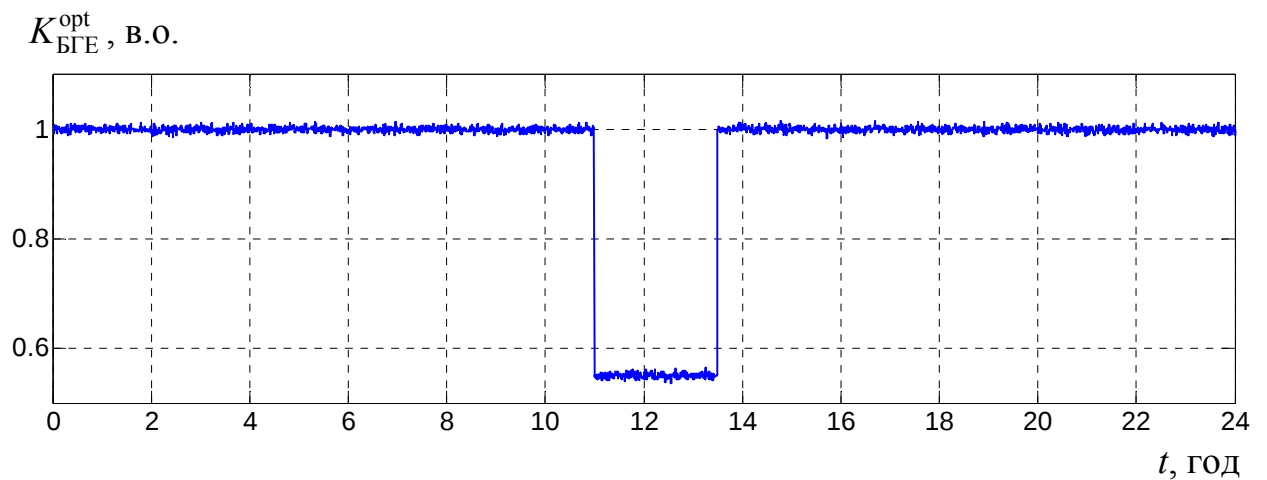


Рис 3.31. Графік коефіцієнта $K_{\text{БГЕ}}^{\text{opt}}$ регулювання потужності БГЕ при автоматичному керуванні генерацією активної потужності розробленою САК

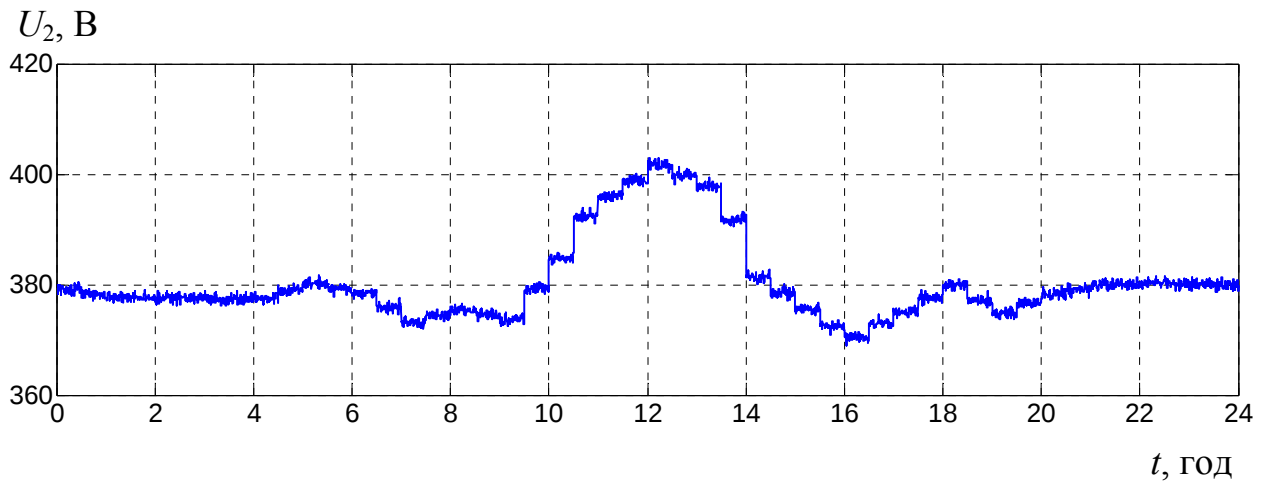


Рис 3.32. Графік напруги на шинах споживачів при автоматичному керуванні генерацією активної потужності розробленою САК

На рис. 3.33 приведені графіки сумарної генерації активної потужності установками з відновлюваними джерелами енергії при відсутності керування генерацією активної потужності, для базової моделі САК (обмежується відхилення напруги на шинах споживачів значенням 5%) при розробленому оптимальному керуванні генерацією активної потужності. На рис. 3.34 – приведена область збільшення.

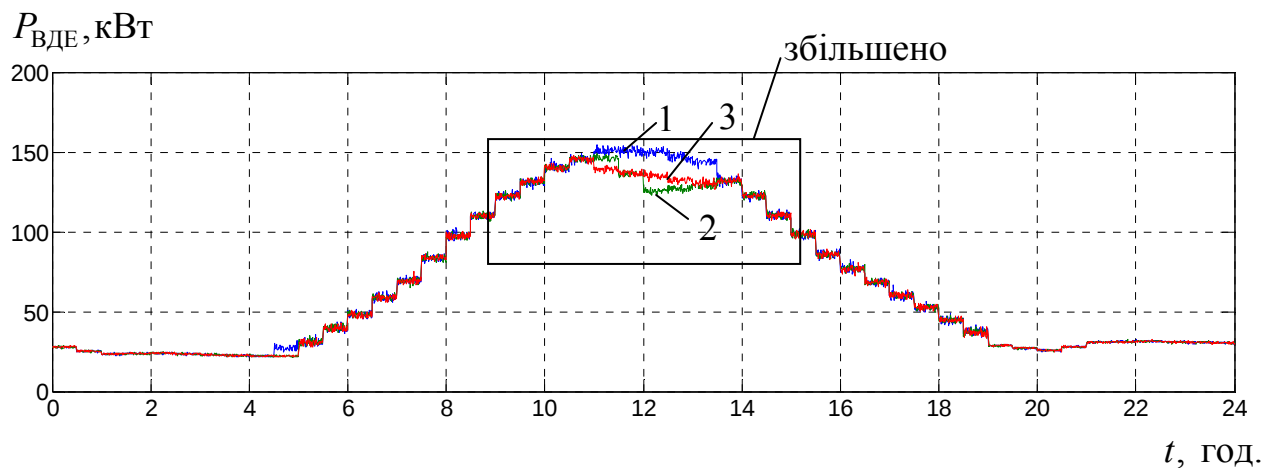


Рис. 3.33. Графіки сумарної генерації потужності установками з ВДЕ

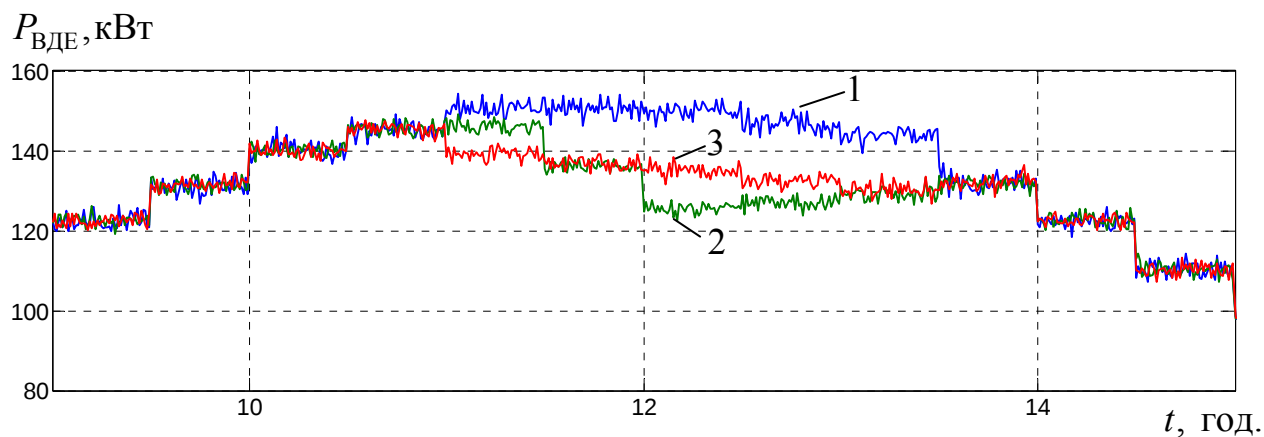


Рис. 3.34. Графіки сумарної генерації потужності
установками з ВДЕ (збільшено)

На рис. 3.33-3.34: 1 – керування відсутнє, 2 – базова модель САК, 3 – розроблена модель САК.

Як видно з графіків рис. 3.33-3.34 розроблена модель САК дозволяє підвищити рівень генерації активної потужності установками з ВДЕ в електричну мережу.

На рис. 3.35 приведені графіки усталеного відхилення напруги на шинах споживачів електричної енергії при відсутності керування генерацією активної потужності, для базової моделі САК та при розробленому оптимальному керуванні генерацією активної потужності. На рис. 3.37 – приведена область збільшення.

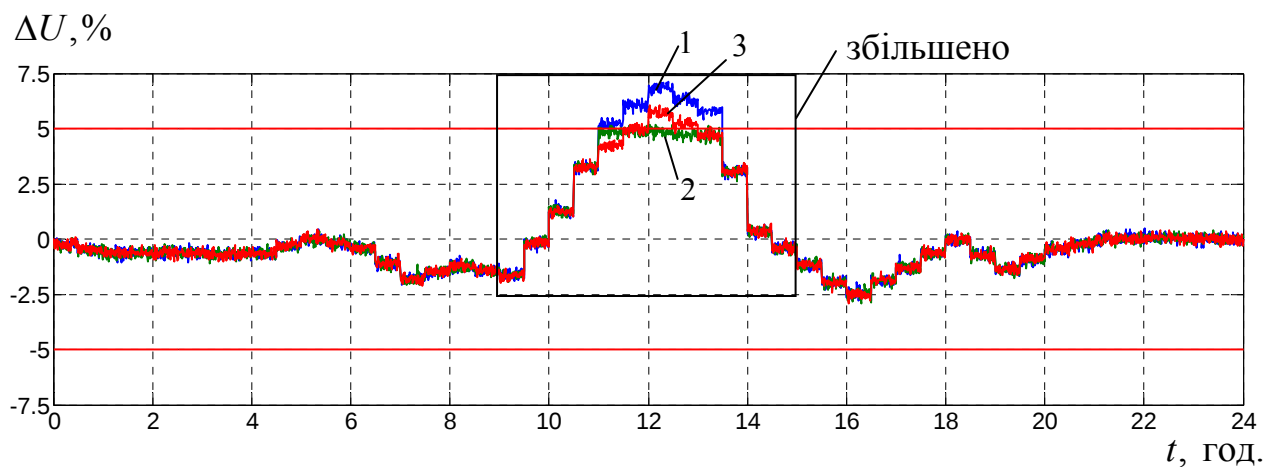


Рис. 3.35. Графіки усталеного відхилення напруги на шинах споживачів
електричної енергії

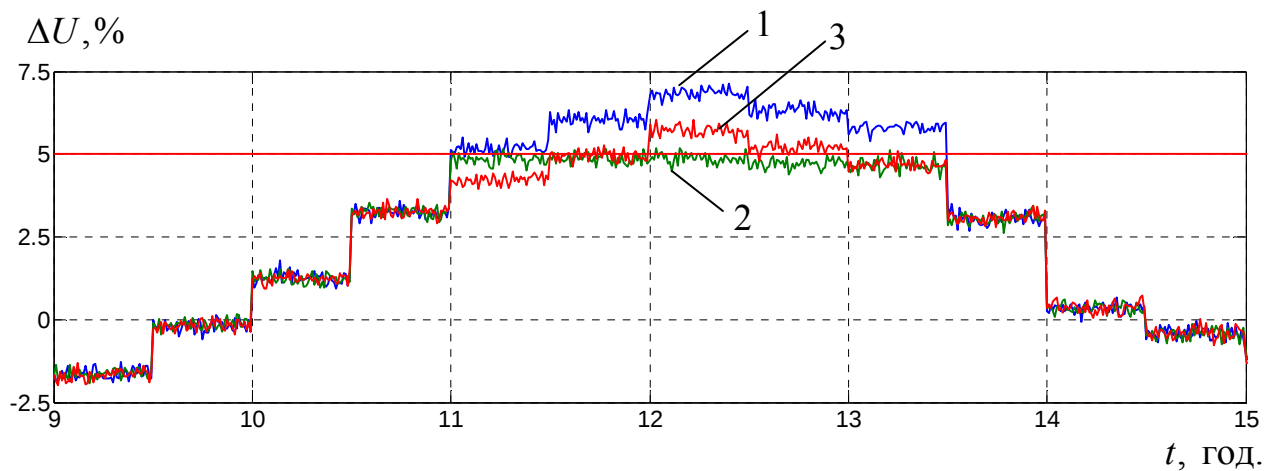


Рис. 3.36. Графіки усталеного відхилення напруги на шинах споживачів електричної енергії (збільшено)

На рис. 3.35-3.36: 1 – керування відсутнє, 2 – базова модель САК, 3 – розроблена модель САК.

Числові результати моделювання та статистична обробка даних по відхиленню напруги на шинах споживача було зведено в таблицю 3.1., де P – інтегральна ймовірність потрапляння величини відхилення ΔU в діапазон значень $\Delta U_{\min} \leq \Delta U \leq \Delta U_{\max}$; $N_{\text{доп}}$ – кількість значень величини ΔU , що входять в діапазон допустимих значень; N – загальна кількість вимірювань величини ΔU .

Так для випадку без керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС видно, що при цьому в РЕМ генерується максимальна кількість електроенергії – отримується найбільша кількість електричної енергії 219,3 кВт·год. Однак відхилення напруги ΔU на шинах споживача виходить за межі допустимих значень $[-5\% \dots 5\%]$ з інтегральною ймовірністю 89,79 %, що суперечить вимогам ГОСТ 13109-97.

Для випадку базової моделі керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС з обмеженням величини ΔU крайніми межами діапазону $[-5\% \dots 5\%]$ вдається досягти 100 % потрапляння значення усталеного відхилення напруги в діапазон допустимих значень. Однак при цьому величина генерації в електроенергії в РЕМ, а відтак і економічний ефект, зменшується на 23,7 %.

Таблиця 3.1 Числові результати моделювання та їх статистичної обробки

№ з/п	Показник	Значення показника		
		Без керування	Базова САК	Розроблена САК
1.	Генерація електроенергії в мережу (з урахуванням навантаження) $W_{\text{ген}}$, кВт·год	219,30	167,25	181,16
2.	Генерація від СЕС $W_{\text{СЕС}}$, кВт·год	1007	984	1004
3.	Генерація від ВЕС $W_{\text{ВЕС}}$, кВт·год	94,16	84,31	83,72
4.	Генерація від БГЕ $W_{\text{БГЕ}}$, кВт·год	528,0	508,8	503,3
5.	Сумарна генерація ВДЕ $W_{\text{ВДЕ}}$, кВт·год	1629,16	1577,11	1591,02
6.	Інтегральна ймовірність потрапляння відхилення напруги U в нормально допустимі межі, $P[-5 < \Delta U < 5]$, %	89,79	100	95,02

Застосування оптимального автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС розробленою САК дозволяє підвищити рівень генерації активної потужності в РЕМ, порівняно з базовою моделлю керування, на 8,13 %. При цьому інтегральна ймовірність потрапляння величини усталеного відхилення напруги в діапазон допустимих значень складає 95 %, що задовольняє вимогам ГОСТ 13109-97.

Таким чином реалізація алгоритму оптимального керування САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС при розглянутих умовах дозволяє підвищити рівень генерації електроенергії в РЕМ на 8,13 % при дотриманні технічних вимог ГОСТ 13109-97 до показника усталеного відхилення напруги ΔU .

Висновки до розділу

1. Розроблені математичні моделі елементів КЕЕС, структурна схема САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС та алгоритм визначення оптимального вектора керування, в основу яких покладено розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації дозволили створити комп'ютерну імітаційну модель САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

2. Зважаючи на значну нелінійність розробленої САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС оцінка стійкості розробленої САК була проведена шляхом аналізу перехідних процесів. Перехідна характеристика розробленої САК була отримана за допомогою комп'ютерного моделювання. Аналіз графіків, отриманих в результаті подачі на вхід розробленої САК ступінчатого збурення показав, що перехідний процес має аперіодичний характер. Це свідчить, що розроблена в роботі САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС задовольняє вимогам стійкості.

3. Результати комп'ютерного моделювання розробленої САК, в основу роботи якої покладено знайдені розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації підтвердили перевагу запропонованої САК над базовою. Так, для випадку розробленої САК величина генерації активної потужності виявилась на 8,13 % більшою в порівнянні з базовою САК. При цьому значення усталеного відхилення напруги для випадку розробленої САК задовольняють вимогам ГОСТ 13109-97.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГЕНЕРАЦІЄЮ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В КОМБІНОВАНІЙ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ

Для перевірки працездатності, а також для експериментального підтвердження отриманих в роботі теоретичних результатів та результатів математичного моделювання роботи САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС необхідно вирішити наступні завдання:

1. Розробити структурну схему мікропроцесорної САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС із використанням сучасної елементної бази.
2. Розробити принципову схему мікропроцесорної САК, в основу якої покладена запропонована в роботі структурна схема та алгоритм визначення керуючих впливів.
3. Розробити лабораторний стенд для експериментального дослідження якості роботи запропонованої в роботі САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.
4. Провести експериментальні дослідження для визначення ефективності запропонованого в роботі методу автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

Вирішенню цих питань присвячений четвертий розділ дисертації.

4.1 Структурна схема мікропроцесорної САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

За результатами проведених попередніх досліджень було визначено структуру САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС та розроблено алгоритм її роботи, що підлягають практичній реалізації.

На рис. 4.1 приведена узагальнена структурна схема САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС із зазначенням вимірювальних каналів напруги, струмів лінії живлення та навантаження.

На рис. 4.1:

Т1 – силовий трансформатор ТМ-160/10;

КЛ1 – кабельна лінія марки ААШв-0,4(3х120) довжиною 0,25 км.

Н – електричне навантаження електроспоживачів;

СЕС, ВЕС, БГЕ – сонячна, вітрова та біогазова електростанція;

ДС₁, ДС₂ – давачі струму;

ДН₁ – давач напруги;

БАК – мікропроцесорний блок автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

В якості первинних вимірювальних перетворювачів струму пропонується застосовувати вимірювальні трансформатори струму. Даний тип первинних вимірювальних перетворювачів має ряд суттєвих переваг в порівнянні з іншими, основними з яких є:

– багатофункціональність призначення, тобто дані первинні вимірювальні перетворювачі можуть застосовуватись не лише для організації вимірювальних каналів запропонованої САК, а й для контролю параметрів режиму роботи КЕЕС та релейного захисту.

– значна їх розповсюдженість та широкий спектр типоміналів;

– досить високий можливий клас точності в широкому діапазоні вимірювання величини струму (0,5 і вище).

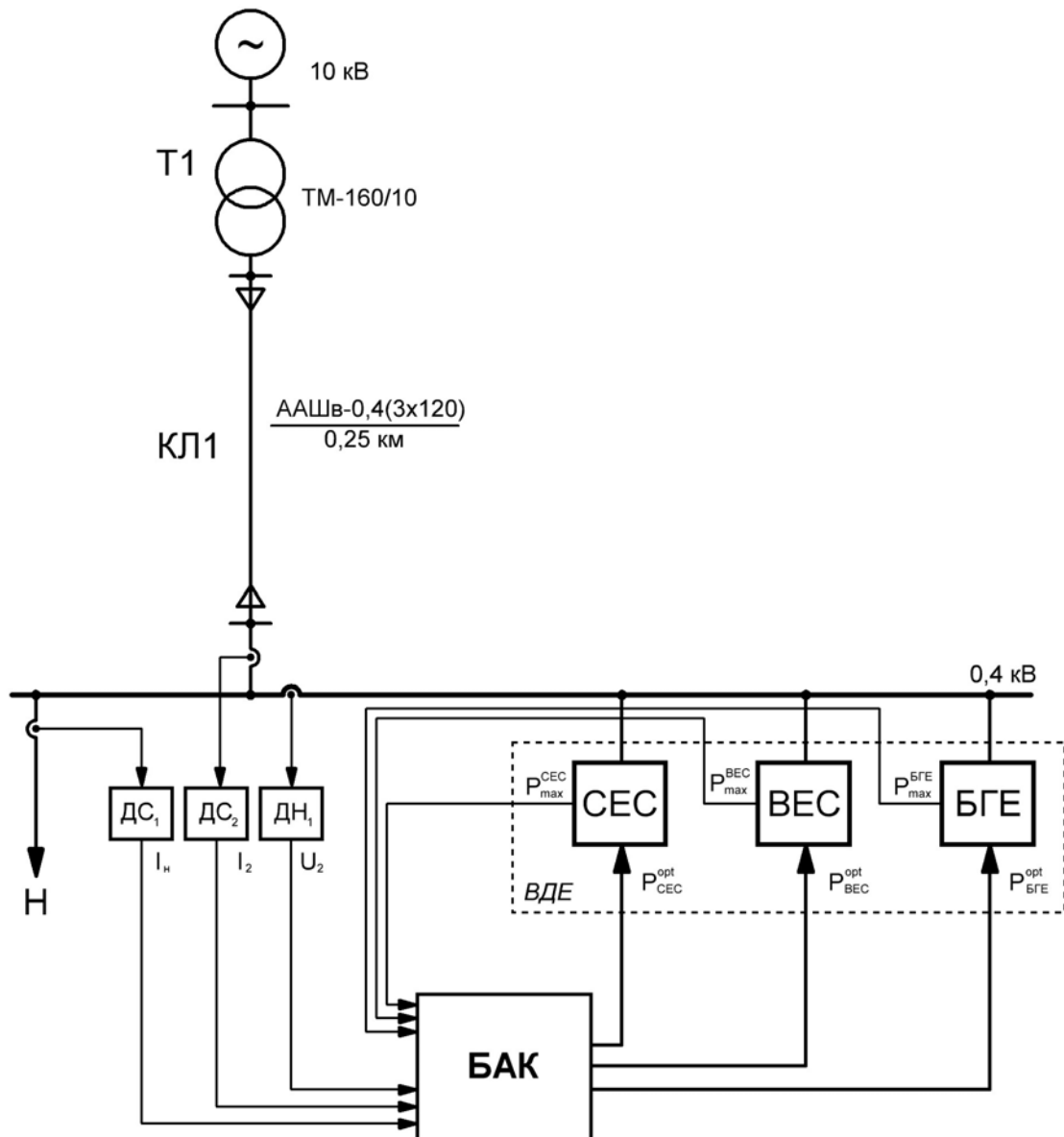


Рис. 4.1. Узагальнена структурна схема САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

Зважаючи на те, що вимірювання параметрів здійснюється на стороні 0,4 кВ, немає необхідності у застосуванні вимірювальних трансформаторів

напруги. Як правило, в таких випадках застосовується пряме підключення вимірювальних приладів до мережі.

Основним елементом структурної схеми САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС є блок автоматичного керування БАК, в якому реалізується розроблений в роботі алгоритм визначення оптимального вектора керування. Тому для перевірки працездатності запропонованої САК необхідно розробити структурну та принципову схеми мікропроцесорної САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

4.2 Технічна реалізація мікропроцесорного БАК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

На рис. 4.2 наведена структурна схема мікропроцесорного БАК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

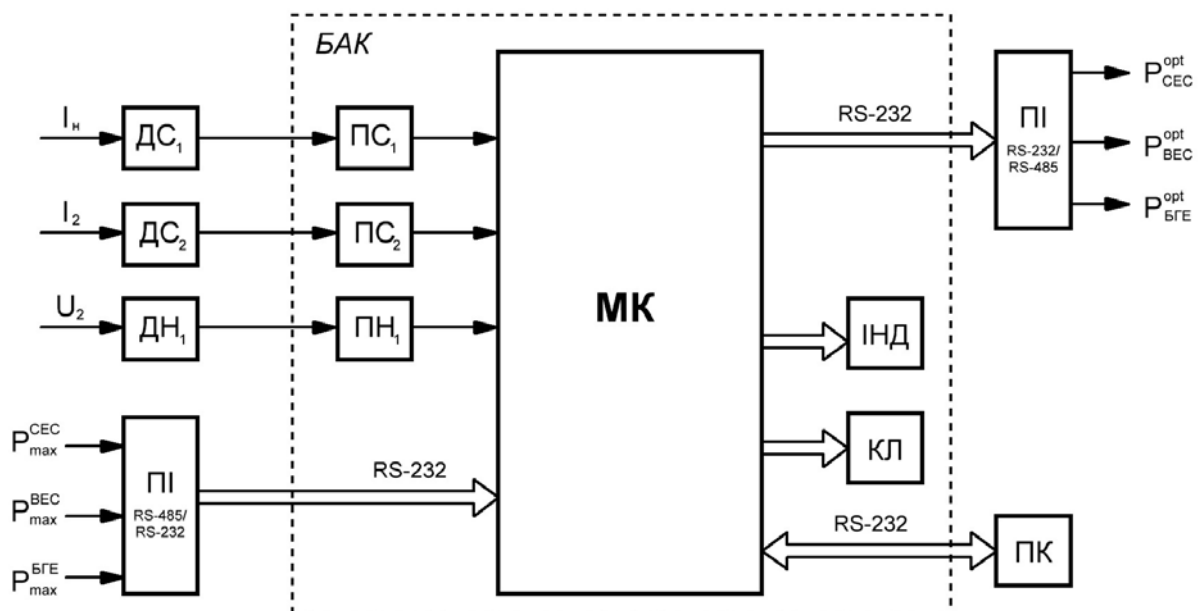


Рис. 4.2. Структурна схема мікропроцесорного БАК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

На рис. 4.2:

БАК – блок автоматичного керування;

МК – мікроконтролер;

ПС₁, ПС₂, ПН₁ – перетворювачі діючих значень струму і напруги із аналогової форми в цифрову;

ДС₁, ДС₂, ДН₁ – давачі струму і напруги;

ПІ – перетворювач інтерфейсу RS-485/RS-232;

ІНД – блок індикації;

КЛ – блок вводу даних з клавіатури;

ПК – персональний комп'ютер.

Блок автоматичного керування, структурна схема якого приведена на рис. 4.2. працює наступним чином. Виміряні значення струму навантаження I_H , струму лінії I_2 та напруги U_2 на шинах споживачів з виходів відповідних давачів ДС₁, ДС₂, ДН₁ надходять на входи перетворювачів струму ПС₁, ПС₂ та перетворювача напруги ПН₁, в яких відбувається перетворення сигналів із аналогової форми в цифрову. Цифрові сигнали з виходів перетворювачів ПС₁, ПС₂ та ПН₁, а також інформація про поточне максимальне можливе значення генерації активної потужності установками з ВДЕ надходять на вхід мікроконтролера МК. Вихідним сигналом МК є вектор оптимального керування, що визначається згідно запропонованого в роботі алгоритму автоматичного керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в складі комбінованої електроенергетичної системи.

Принципова електрична схема БАК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС наведена в додатку А (рис. А.1). Основним елементом зазначеної принципової схеми є 8-бітний мікроконтролер Atmega162, обчислювальні ресурси якого дозволяють реалізувати розроблений алгоритм визначення оптимального вектора керування [106-113].

Принципова схема блоку перетворення сигналів БПС наведена в додатку Б (рис. Б.1). В якості аналого-цифрових перетворювачів струму та напруги було використано мікросхеми ADE7758 виробництва фірми Analog Devices. Такий вибір обумовлено тим, що ADE7758 являє собою спеціалізовану мікросхему багатофункціонального лічильника електричної енергії, та дозволяє отримати на виході інформацію про діючі значення струмів та напруг. Це в свою чергу дозволяє зменшити обчислювальне навантаження на основний мікроконтролер БАК.

Зовнішній вигляд макету БАК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС наведено на рис. 4.3.

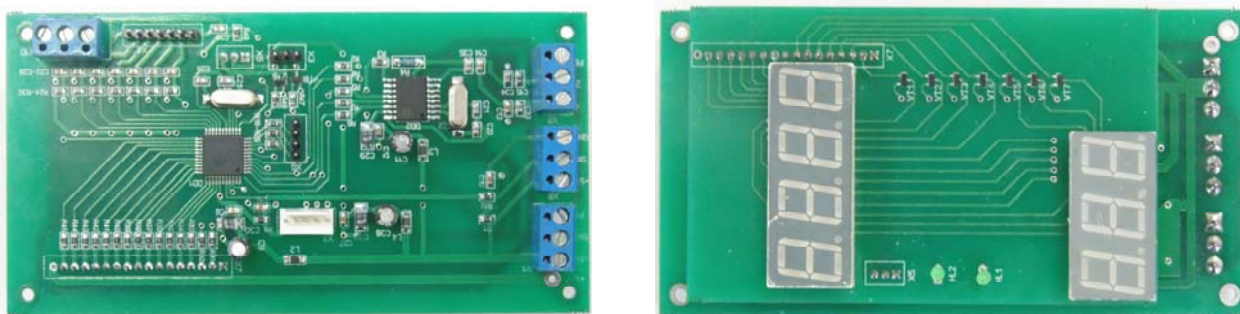


Рис. 4.3. Зовнішній вигляд макету блоку автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

Перевірку працездатності розробленої мікропроцесорної САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС найдоцільніше здійснити шляхом експериментальних досліджень.

4.3 Експериментальні дослідження САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

Для здійснення експериментальних досліджень розробленої мікропроцесорної САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС було розроблено лабораторний стенд, функціональна схема якого зображена на рис. 4.4.

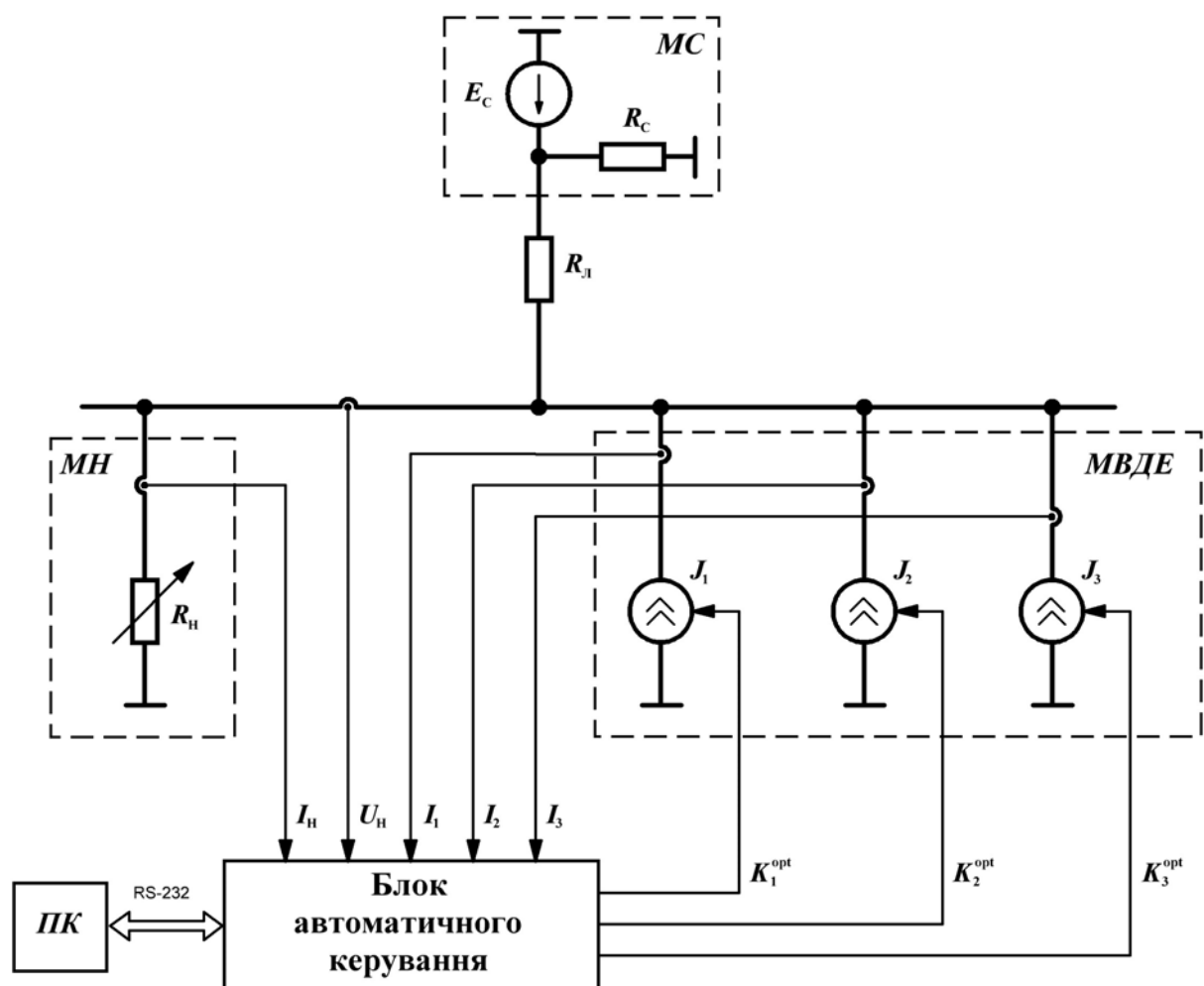


Рис. 4.4. Функціональна схема лабораторного стенду для експериментального дослідження мікропроцесорної САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

На рис. 4.4:

МС – модель системи електропостачання;

E_C – джерело стабілізованої напруги, що моделює ЕРС системи електропостачання;

R_C – резистор, що моделює опір споживачів системи електропостачання;

R_L – резистор, що моделює еквівалентний опір елементів електропередачі;

МН – модель навантаження;

R_H – резистор, що моделює опір споживачів електроенергії;

МВДЕ – модель відновлюваних джерел енергії;

J_1, J_2, J_3 – програмовані джерела струму, що моделюють генерацію потужності від СЕС, ВЕС, БГЕ;

БАК – блок автоматичного керування генерацією активної потужності;

$K_1^{\text{opt}}, K_2^{\text{opt}}, K_3^{\text{opt}}$ – складові вектора оптимального керування;

I_H – вимірне значення струму навантаження;

U_H – вимірне значення напруги на шинах споживачів;

I_1, I_2, I_3 – виміряні значення струмів джерел J_1, J_2, J_3 ;

ПК – персональний комп'ютер.

Для моделювання генерації активної потужності установками з ВДЕ було використано трьохканальне програмоване джерело струму, принципова схема якого приведена в додатку В (рис. В.1). Даний пристрій побудовано на основі мікроконтролера Atmega 162, цифро-аналогових перетворювачів AD5446 та операційних підсилювачів AD8510. Інформація про максимально можливі поточні значення генерації активної потужності $P_{\text{max}}^{\text{СЕС}}, P_{\text{max}}^{\text{ВЕС}}, P_{\text{max}}^{\text{БГЕ}}$ зберігається в енергонезалежній пам'яті EEPROM Atmega 162. Значення

складових оптимального вектора керування $K_{\text{СЕС}}^{\text{opt}}$, $K_{\text{ВЕС}}^{\text{opt}}$, $K_{\text{БГЕ}}^{\text{opt}}$ надходять від БАК по інтерфейсу RS-232.

Зовнішній вигляд лабораторного стенду для експериментального дослідження САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС зображений на рис. 4.5.

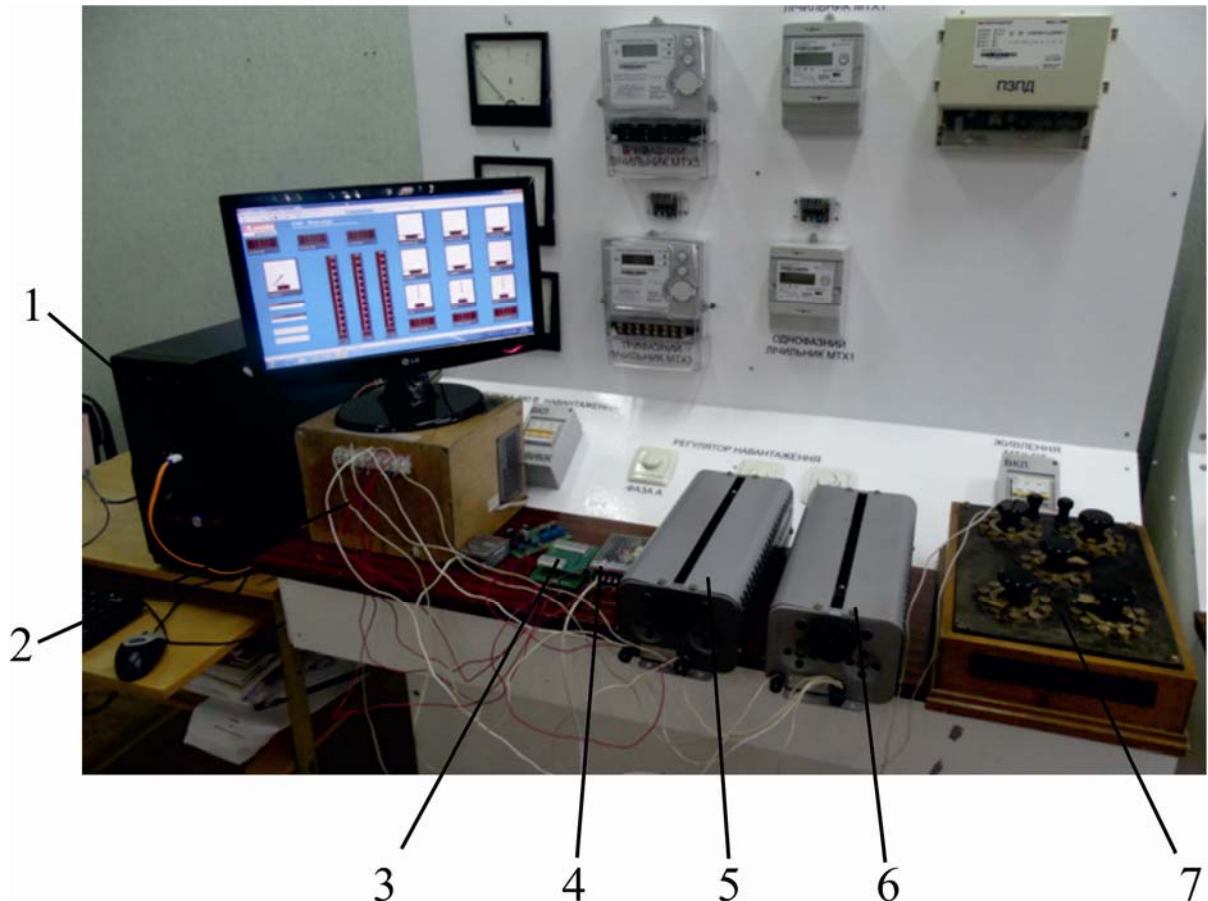


Рис. 4.5. Зовнішній вигляд лабораторного стенду для експериментального дослідження САК блоку керування рівнем генерації активної потужності в КЕЕС з ВДЕ

На рис. 4.5:

- 1 – персональний комп'ютер;
- 2 – програмоване джерело живлення;
- 3 – макет блоку автоматичного керування;
- 4 – джерело стабілізованої напруги;

5 – реостат для моделювання опору споживачів системи електропостачання;

6 – реостат для моделювання еквівалентного опору елементів електропередачі;

7 – магазин опорів для моделювання опору навантаження.

Для експериментальних досліджень були використані ті самі дані про потужності генерації СЕС, ВЕС і БГЕ що і для випадку комп'ютерного імітаційного моделювання. Результати експериментальних досліджень наведені на рис. 4.6-4.9.

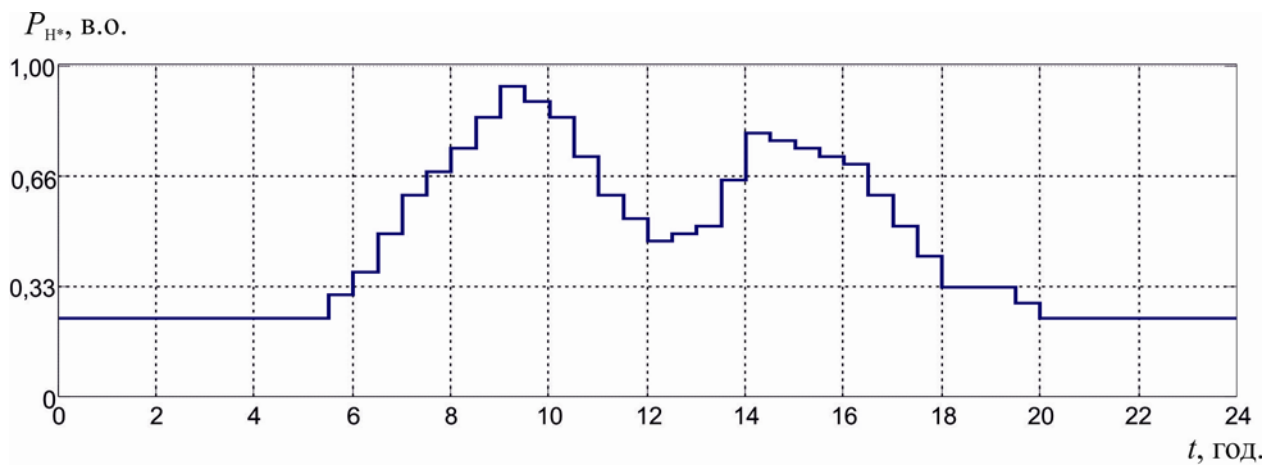


Рис. 4.6. Потужність навантаження електроспоживачів

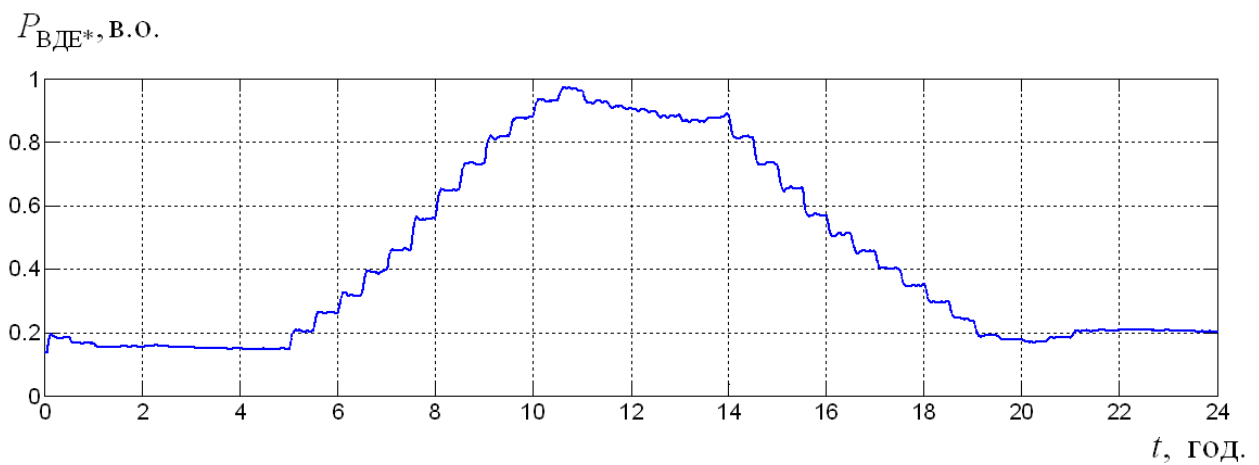


Рис. 4.7. Сумарна потужність генерації установок з ВДЕ

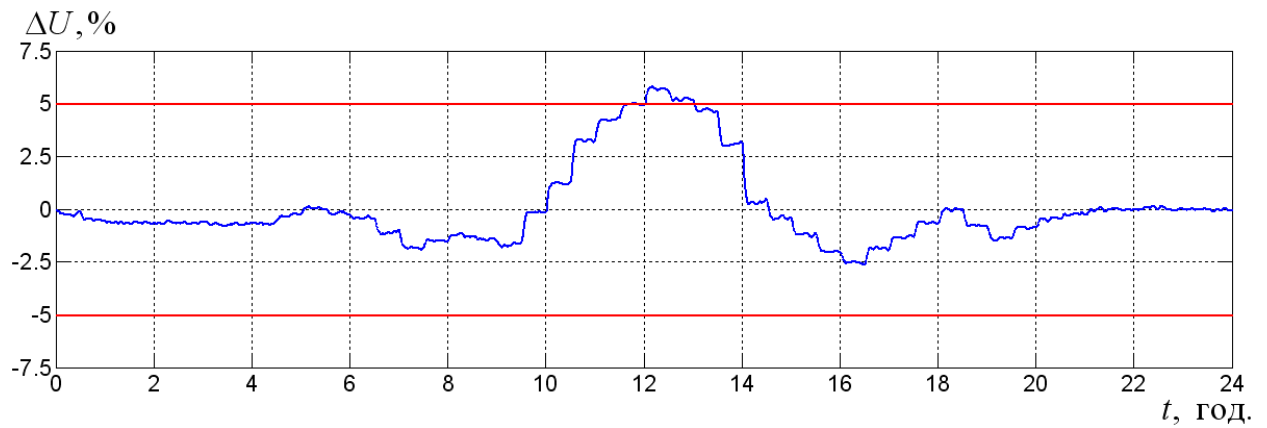


Рис. 4.8. Відхилення напруги на шинах споживача

Результати статистичної обробки даних отриманих в результаті комп'ютерного імітаційного моделювання та експериментального дослідження наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Результати статистичної обробки результатів експериментальних досліджень та комп'ютерного імітаційного моделювання

№ з/п	Параметр режиму	Математичне очікування, M	Середньо- квадратичне відхилення, σ
Результати комп'ютерного імітаційного моделювання			
1.	Потужність навантаження електроспоживачів, P_n , в.о.	0,4832	0,2455
2.	Потужність генерації ВДЕ, $P_{ВДЕ}$, в.о.	0,4226	0,2880
3.	Усталене відхилення напруги, ΔU , %	0,0931	1,9554
Результати експериментальних досліджень			
4.	Потужність навантаження електроспоживачів, P_n , в.о.	0,4833	0,2552
5.	Потужність генерації ВДЕ, $P_{ВДЕ}$, в.о.	0,4357	0,2878
6.	Усталене відхилення напруги, ΔU , %	0,0966	1,9473

Як видно з результатів статистичної обробки даних, що наведені в таблиці 4.1. похибка між результатами експерименту та комп'ютерного імітаційного моделювання лежить в межах 3-4%. Це свідчить про правильність проведених в роботі теоретичних досліджень та працездатність розробленої САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

Висновки до розділу

1. На основі розробленої комп'ютерної імітаційної моделі та створеного алгоритму роботи САК було розроблено структурну схему мікропроцесорної САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

2. На основі запропонованої структурної схеми мікропроцесорної САК було розроблено її принципову схему на базі сучасної мікропроцесорної техніки, а також програмне забезпечення до неї. Технічна реалізація САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС базується на розповсюджених загальнопромислових мікропроцесорних пристроях, що, безперечно, є її перевагою.

3. Розроблений лабораторний стенд для експериментального дослідження якості роботи запропонованої в роботі САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС дозволив виконати експериментальні дослідження запропонованої САК.

4. Порівняння результатів проведених експериментальних досліджень з даними комп'ютерного імітаційного моделювання та відповідна обробка статистичних даних показала, що розходження між ними складає менше 4 %. Це свідчить про правильність проведених в роботі теоретичних досліджень та працездатність розробленої САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на основі одержаних теоретичних і практичних результатів розв'язана актуальна наукова задача автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС для забезпечення максимально можливого рівня генерації активної потужності установками з ВДЕ за умов дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів до розподільної електричної мережі.

Виконані у дисертаційній роботі дослідження дозволяють сформулювати такі висновки:

1. Аналіз існуючих методів та способів автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС показав, що основною причиною зниження ефективності роботи установок з ВДЕ є неповне використання наявної потужності генерації ВДЕ внаслідок встановлення фіксованого значення максимально допустимого рівня напруги.

2. Формалізація задачі автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС показала, що цю задачу найдоцільніше інтерпретувати як задачу багатокритеріальної оптимізації.

3. В результаті аналізу існуючих методів розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації встановлено, що для визначення розв'язку задачі автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС найбільш доцільно використати метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв.

4. Для розробки комп'ютерної імітаційної моделі САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС, що дозволяє проводити аналіз роботи запропонованої САК, необхідно застосувати розроблені в роботі структурну схему САК та алгоритм визначення оптимального вектора керування.

5. В результаті проведеного аналізу ефекту від застосування розв'язку задачі автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС на комп'ютерній імітаційній моделі показав, що запропонована САК має значну перевагу над існуючими. Так, кількість електроенергії, що генерується установками з ВДЕ для випадку розробленої моделі виявилася на 8,13 % більшою у порівнянні із базовою САК. При цьому значення усталеного відхилення напруги як для розробленої, так і базової САК задовольняє вимогам ГОСТ 13109-97.

6. Проведені експериментальні дослідження, з використанням макетного зразка розробленої САК, підтвердили працездатність запропонованої системи. Економічний ефект, у порівнянні із випадком роботи базової моделі, отриманий за рахунок збільшення генерації активної потужності установками з відновлюваними джерелами складає 7345,95 грн., а термін окупності – 1,8 років.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/file/text/58/f469391n10.pdf>
2. Кириленко О. В. Технічні аспекти впровадження джерел розподіленої генерації в електричних мережах / О. В. Кириленко, В. В. Павловський, Л. М. Лук'яненко // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 1. – С. 46–53.
3. Кириленко О. В. Аналіз впливу приєднання відновлюваних джерел електроенергії на рівні напруги електричних мереж / О. В. Кириленко, В. В. Павловський, Л. М. Лук'яненко, А. Е. Зоммер // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність» – 2011. – Ч. 2. – С. 44–49.
4. Кириленко О. В. Проблеми інтеграції відновлюваних джерел електроенергії в «слабкі» електричні мережі / О. В. Кириленко, В. В. Павловський, Л. М. Лук'яненко, І. В. Трач // Технічна електродинаміка. – 2012. - № 3. – С. 25-26
5. Кириленко О. В. Технічні особливості функціонування енергосистем при інтеграції джерел розподіленої генерації / О. В. Кириленко, І. В. Трач // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр. 2009. – Вип. 24. - С. 3–6
6. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування розосередженими джерелами енергії в локальній електричній системі / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. А. Ковальчук // Праці Інституту електродинаміки НАН України: збірник наукових праць. Спеціальний випуск, ч. 1. – 2011. – С. 48–55.
7. Лежнюк П. Д. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько //

Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал. – 2015. – № 3 (41). – С. 7–13.

8. Солдатенко В. П. Автоматичне керування режимами роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / В. П. Солдатенко, С. П. Плешков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – 2017. №34(1256)2017 – С. 66–70

9. Солдатенко В. П. Система автоматичного керування роботою комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні навки. Вип. 187 Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2017 – С. 37–39.

10. Закон України «Про електроенергетику». Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/575/97-%D0%B2%D1%80>

11. Державне агенство з енергоефективності та енергозбереження України. Офіційний сайт. Режим доступу: <http://saee.gov.ua/uk/news/2450>

12. Національна енергетична компанія Укренерго. Офіційний сайт. Режим доступу: <https://ua.energy>.

13. Twidell J., Weir T. Renewable Energy Resources ED2. – New York, Taylor & Francis, 2012. – 601 P.

14. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підручник / С.О. Кудря. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с.

15. Возобновляемые источники энергии: учебное пособие для вузов / А.Дж. Обозов, Р.М. Боптаев – Бишкек, 2010. – 218 с.

16. Мхитарян Н.М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников. Опыт и перспективы. – К.: Наук. Думка, 1999. – 320 с.

17. Системы генерирования электрической энергии с использованием возобновляемых энергоресурсов: учебное пособие / С.Г. Обухов. – Томск: ТПУ, 2008. – 140 с.

18. Баскаков А.П., Мунц В.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебн. для вуз. – М.: Изд. Дом «БАСТЕТ», 2013. 368 с.
19. Германович В., Турилин А. Альтернативные источники энергии и энергоснабжение. Практические конструкции по использованию ветра, солнца, воды, земли, биомассы. – СПб.: Наука и Техника, 2014. – 320 с.
20. Альтернативная энергетика без тайн / Стэн Гибилиско. М.: Эксмо, 2010. – 368 с.
21. Праховник А.В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения. – К.: «Освита України», 2007. – 464 с.
22. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Учебное издание. – М.: ИП РадиоСофт, 2008. – 228 с.
23. Щербина О. Енергія для всіх. Технічний довідник з енергоощадності та відновлюваних джерел енергії. – Ужгород, 2007. – 336 с.
24. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебн. для вуз. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
25. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
26. Шидловский А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – К.: Наук. думка, 1985. – 268 с.
27. Шидловский А.К. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях / А.К. Шидловский, В.А. Новский, Н.Н. Каплычный. – К.: Наук. думка, 1989. – 312 с.
28. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Взамен ГОСТ 13109-87; Введ. 01.01.00. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 31 с.
29. Лежнюк П. Д. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікітович, В. В. Кулик. – Вінниця: ВНТУ, 2014 – 204 С.

30. Сокол Е.И. Использование средств силовой электроники для создания новых технологий в системе передачи электрической энергии // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Спец. випуск – 2010. – С. 30-34.
31. Шавьолкін О.О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. посібник. Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. 2015. – 403 с.
32. Семенов Б.Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов. М.: СОЛОН-Р, 2001. – 327 с.
33. Handbook of wind energy / Tony Burton... [et al.]. – John Wiley & Sons, Ltd, 2001. – 642 p.
34. Patel R Wind and Solar Power System / R. Patel, R. Mukund – CRC Press, 1999. – 350 p.
35. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.
36. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2005. – 519 с.
37. Безруких П.П. Использование энергии ветра. Техника, экономика, экология. М.: Колос, 2008 – 196 с.
38. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки / В.П. Харитонов – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.
39. Шевченко В.В., Кулиш Я.Р. Анализ возможности использования разных типов генераторов для ветроэнергетических установок с учетом диапазона мощности. / В.В. Шевченко, Я.Р. Кулиш. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. № 65(1038) – 2013 - с.110-117
40. Данилевич Я.Б. Новые конструкции генераторов и проблемы их создания / Я. Б. Данилевич, Л. И. Чубраева // Санкт- Петербург : Наука, 1993.– 223 С.

41. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. – 2-е изд., перераб., – Л.: Энергия, 1974
42. Немудрий І.Ю. Підвищення ефективності електромеханічної системи вітроелектричних установок з аеродинамічною мультиплікацією. Автореферат дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. Дніпропетровськ 2015.
43. Ключков С.Е. Особенности применения асинхронизированного синхронного генератора / С.Е. Ключков, В.М. Завьялов С. 145-148.
44. Бубенчиков А.А. Применение ветроколес и генераторов для ветроэнергетических установок малой мощности / А.А. Бубенчиков, Е.Ю. Артамонова, Р.А. Дайчман, Л.А. Файфер, Ф.В. Катеров, Т.В. Бубенчикова // Международный научно-исследовательский журнал. №5(36) - 2015. – С. 35-39.
45. Баадер И. Биогаз: теория и практика / И. Баадер, Е. Доне, М. Бренндер-фер; пер. с нем. с пред. М.И. Серебряного. – М.: Колос, 1982. – 148 с.
46. Неисчерпаемая энергия. Кн. 3. Альтернативная энергетика. / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2006. – 643 с.
47. Басок Б.И. Анализ когенерационных установок. Часть 1. Классификация и основные показатели [Текст] / Б.И. Басок, Е.Т. Базеев, В.М. Диденко, Д.А. Коломейко // Пром. теплотехника. – 2006. – Т.28, №3. – С. 83 – 89.
48. Тарахтий О.С. Система автоматического управления когенерационной энергетической установкой учитывающая изменение качества топлива Автореф. дис. канд. техн. наук. – Одесса, 2015.
49. Мещанинов П.А. Автоматизация судовых электростанций. – Л.: Судостроение, 1970.

50. Хватов О.С. Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.М. Тарасов // Вэстник ИГЭУ. Вып 2. – 2010 – С.

51. Blaabjerg F. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems / F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A.V. Timbus // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.53, no.5, pp.1398-1409, Oct. 2006.

52. Blaabjerg F. Power electronics as an enabling technology for renewable energy integration / F. Blaabjerg and Z. Chen // J. Power Electron., vol. 3, no. 2, pp. 81–89, Apr. 2003

53. Blaabjerg F. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems / F. Blaabjerg F, Z. Chen, S. Kjaer // IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, Sep. 2004

54. Blaabjerg F., Liserre M., Ma K. Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems / F. Blaabjerg, M. Liserre, K. Ma // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2012. – Vol. 48. – No.2. – P. 708–719.

55. Chen Z. A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines / Z. Chen, J.M. Guerrero, F. Blaabjerg // IEEE Transactions on power electronics. – 2009. – Vol. 24. – No.8. – P. 1859–1875.

56. Power electronics and reliability in renewable energy systems. / F. Blaabjerg, K. Ma, D. Zhou

57. Power electronics for renewable energy systems: Wind turbine and photovoltaic systems / F. Blaabjerg, U.M. Choi, K.B. Lee.

58. Технічні характеристики інверторів SMA – Каталогова інформація. Режим доступу: <https://www.sma.de/en.html>

59. Технічні характеристики інверторів Steca – Каталогова інформація. Режим доступу: <https://www.steca.com>

60. Технічні характеристики інверторів ABB – Каталогова інформація. Режим доступу: <https://new.abb.com/power-converters-inverters/solar>

61. Технічні характеристики інверторів Froniys – Каталогова інформація. Режим доступу: <https://www.fronius.com/en/photovoltaics>
62. Технічні характеристики інверторів SofarSolar – Каталогова інформація. Режим доступу: <http://www.sofarsolar.com/products>
63. Технічні характеристики інверторів Huawei – Каталогова інформація. Режим доступу: <http://huawei.energy/ua/products/>
64. Технічні характеристики інверторів KACO – Каталогова інформація. Режим доступу: <https://kaco-newenergy.com/products/>
65. Технічні характеристики інверторів Samil Power – Каталогова інформація. Режим доступу: <http://www.samilpower.com/>
66. WATTrouter – контроллер излишков электроэнергии. Режим доступу: <http://www.watrouter.ru/watrouter>
67. Инструкция по эксплуатации генераторов переменного напряжения QAS 60-80-100 Pd 2010. – 122 С. Режим доступу: https://mototech.ru/manuals/rukovodstvo_manual_atlas_copco_qas.pdf
68. Жуйков В. Я. Силовая электроника в смарт-сетях / В. Я. Жуйков // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 49-50
69. Лобунец И.А. Системы генерирования ветроэлектрических установок большой мощности / И.А. Лобунец, Т.В. Плотникова, Ю.Г. Шакарян и др. // Энергетик. 2000. № 4. С.11-13
70. Степанов С.Ф. Некоторые аспекты применения силовой преобразовательной техники в автономных источниках электроснабжения / С.Ф. Степанов, И.И. Артюхов, А.В. Коротков, Н.В. Погодин // Вестник СГТУ. 2004. № 4 (5) С.91-96.
71. Технічні характеристики метеостанції WeatherHawk – Каталогова інформація.
Режим доступу: <https://www.weatherhawk.com/product/weatherhawk-232-weather-station/>
72. Плешков П.Г. Оптимальне керування режимом роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії /

П.Г. Плешков, Н.Ю. Гарасьова, В.П. Солдатенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – №32 (1308). – С. 64-70

73. Электроснабжение сельскохозяйственных потребителей на базе комплексной электроэнергетической системы с использованием возобновляемых источников энергии / П.Г. Плешков, С.П. Плешков, А.И. Котыш, В.П. Солдатенко // Електротехніка і електромеханіка, 2007, №4. – С. 50-52.

74. 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 // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Вип. 87. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України – Харків: ХНТУСГ, 2009. – С. 24-26.

75. Вибір системи електропостачання з відновлювальними джерелами / Т.Г. Сабірзянов, П.Г. Плешков, М.В. Кубкін, В.П. Солдатенко // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки. Вип. 117. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» – Харків: ХНТУСГ, 2011 – С. 17–19.

76. Математична модель фотобатарей як джерела електричної енергії / Т. Г. Сабірзянов, М.В. Кубкін, В.П. Солдатенко, О.А. Козловський // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград: КНТУ, 2012. – Вип. 25, ч. 1. – С. 331-335.

77. Солдатенко В. Имитационная модель гибридной электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии / В. Солдатенко, М. Кубкин, Л. Вихрова // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. An International Journal on Operation of Farm and Agri-Food Industry Machinery – Lublin, 2014 – Vol. 16, №4 – P. 233-240.

78. Плешков П.Г. Підвищення енергоефективності сільськогосподарського виробництва центрального регіону України на основі комплексної електроенергетичної системи / П.Г. Плешков, В.П. Солдатенко // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: Матеріали П'ятої міжнародної науково-практичної конференції. – Львів: ЛВЦНТЕІ, – 2009. – С.51-55;

79. Сабірзянов Т. Г Рекомендації по застосуванню даних про сонячну радіацію для сонячних установок в умовах Кіровоградського регіону / Т.Г. Сабірзянов, М.В. Кубкін, В.П. Солдатенко // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» – Тернопіль: ТНТУ, 2010 – С. 119.

80. Солдатенко В.П. Автоматичне керування режимами роботи розподільної електричної мережі при наявності джерел розосередженої генерації / В.П. Солдатенко // Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції, 16-17 листопада 2017 р., Кропивницький:ЦНТУ, 2017. – С. 88-90.

81. Плешков П.Г. Керування режимами роботи розподільної електричної мережі при наявності джерел розосередженої генерації / Плешков П.Г., Солдатенко В.П. // Прикладні науково-технічні дослідження (Appliennd scientific and technical research): Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції, 3-5 квітня 2018 р., Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2018. – С. 71.

82. Плешков П.Г. Моделювання роботи системи оптимального керування режимом електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / Плешков П.Г., Солдатенко В.П. // Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві (АКІТ-2018): Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 15-16 листопада 2018 р., Кропивницький: ЦНТУ, 2018. – С. 103-104.

83. Плешков П.Г. Знаходження розв'язків задачі автоматичного керування режимом комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / Плешков П.Г., Солдатенко В.П., Майборода С.О. // Перспективні напрямки інформаційних і комп'ютерних систем та мереж, комп'ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет конференції, 13-14 листопада 2018 р., Кропивницький: ЦНТУ, 2018. – С. 64.

84. Сабірзянов Т.Г. Методика вибору структури і складу систем електропостачання з відновлювальними джерелами / Т.Г. Сабірзянов, М.В. Кубкін, В.П. Солдатенко // Збірник наук/ праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машино-будування, автоматизація. – Кіровоград: КНТУ, 2011. Вип.24, ч.2.- С. 146-151.

85. Дослідження енергетичного потенціалу регіональних альтернативних джерел для оптимізації паливно-енергетичних балансів / П.Г. Плешков, М.В. Кубкін, К.Г. Петрова та ін. // Вісник ХДТУСГ ім. П.Василенка. Техн.. науки. Випуск 141. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» – Харків: ХНТУСГ, 2013 – С. 54-57

86. Пат. 71470 МПК H02J 3/00. Спосіб живлення споживачів електричної енергії від централізованої енергосистеми і відновлюваних джерел енергії / Кубкін М. В, Солдатенко В. П., Сіріков О.І. Номер заявки u 201200725; заявл. 24.01.2012; опубл. 10.07.2012, Бюл. №13.

87. Машунин Ю. К. Методы и модели векторной оптимизации. – М.: Наука, 1986. – 141 С.

88. Черноруцкий И. Г. Методы принятия решений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 С.

89. Растрингин Л. А. Современные принципы управления сложными объектами. – М.: Сов. радио, 1980. – 232 С.

90. Розен В. П. Оптимізація процесів вироблення електроенергії комбінованою електроенергетичною системою / В. П. Розен, Є. М. Іншеков, І. В. Калінчик // Енергетика. – 2013. – №. 1. – С. 20-26.
91. Зінзура В. В. Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах / В. В. Зінзура // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / – Вип. 25, Ч. 1 – Кіровоград: КНТУ, 2012. – С. 350-360.
92. Токарев В. В. Методы оптимальных решений. В 2 т. Т. 2. Многокритериальность. Динамика. Неопределенность. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 С.
93. Reid, D. A. et al., Proof in Mathematics Education: Research, Learning, and Teaching. – John Wiley & Sons Publishers, 2010. – P. 266.
94. Schrijver, Alexander. Combinatorial Optimization: Polyhedra and Efficiency. – Springer. – Vol. 24.
95. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 446 с.
96. Bedescu V. Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface Recent Advances. – Springer, Bucharest, 2008 – 580 p.
97. Duffie J. Solar engineering of thermal processes / J. Duffie, W. Beckman. – John Wiley & Sons, Inc, New York – 1980.
98. Сивухин Д.В. Общий курс физики. – М.: Наука, 1975. – Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. – 519 с.
99. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 645 с.
100. Атмосфера стандартная. Параметры. ГОСТ 4401-81
101. Muselli M. Design of hybrid-photovoltaic power generation, with optimization of energy management / M Muselli // Solar Energy/ – 1999. – Vol. 65. – №3. – P. 143–157.

102. Ульянов О. Методы повышения эффективности транзисторных преобразовательных схем / О.И. Ульянов, А.В. Саксонов, В.А. Трофимов – Куйбышевское книжное издательство, 1976. – 96 с.

103. Сабірзянов Т.Г. та інші. Розробка та дослідження комплексної електроенергетичної системи з використанням нетрадиційних та поновлювальних джерел енергії для сільськогосподарського виробництва. Звіт про науково-дослідну роботу. Депоновано в УкрІНТЕІ, №0110U002140. Кіровоград. 2011. – 278 с.

104. Інтернет ресурс: <https://www.meteoblue.com>

105. Інтернет ресурс: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>

106. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Tiny и Mega фирмы «ATMEL» / А.В. Евстифеев – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. – 560 с.

107. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Mega. Руководство пользователя / А.В. Евстифеев – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. – 592 с.

108. Голубцов М.С. Микроконтроллеры AVR: от простого к сложному / М.С. Голубцов – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 288 с.

109. Хартов В.Я. Микроконтроллеры AVR. Практикум для начинающих / В.Я. Хартов – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 240 с.

110. Мотрон Д. Микроконтроллеры AVR. Вводный курс / Д. Мотрон – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2006. – 272 с.

111. Баранов В.Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы / В.Н. Баранов – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. – 288 с.

112. Тамперт В. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR-микроконтроллеров / В. Тамперт – К.: «МК-Пресс», 2006. – 208 с.

113. Шпак Ю.А. Программирование на языке C для AVR и PIC микроконтроллеров / Ю.В. Шпак – К.: «МК-Пресс», 2006. – 400 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Техніко-економічна оцінка ефективності використання САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

Для оцінки ефективності застосування розробленої САК генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі у порівнянні із базовою САК необхідно провести розрахунок економічних показників для обох варіантів. В якості базової моделі для порівняння було обрано САК, яка здійснює таке керування рівнем генерації активної потужності ВДЕ в КЕЕС, при якому відхилення напруги ΔU на шинах споживача не перевищує нормально допустимого значення 5%.

Економічний ефект від застосування запропонованої в роботі САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС:

$$E = Z_{\text{б}} - Z_{\text{р}}, \quad (\text{A.1})$$

де $Z_{\text{б}}$ – приведені затрати на базовий варіант, тис. грн./рік;

$Z_{\text{р}}$ – приведені затрати на проектний варіант, тис. грн./рік.

Приведені затрати визначаються за формулою:

$$Z_i = E_{\text{н}} K_i + I_{\text{а.о.і}} + U_i, \quad (\text{A.2})$$

де $E_{\text{н}}$ – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень, 1/рік; для запропонованої методики приймається $E_{\text{н}} = 0,15$;

K_i – капіталовкладення в i -й варіант; так як відбувається модернізація існуючої САК, то для базового варіанту $K_{\text{б}} = 0$, тис. грн.;

$I_{a.o.i}$ – витрати на амортизацію і обслуговування обладнання для i -го варіанту, тис. грн./рік;

U_i – збиток від зниження якості електроенергії, тис. грн./рік;

Як показали результати моделювання, за умови роботи розробленої САК виникають понаднормові значення усталеного відхилення напруги.

Для розрахунку економічних збитків від відхилення напруги скористаємось методикою, описаною в [6], основні положення якої полягають в наступному.

Щорічний економічний збиток від понаднормових значень усталеного відхилення напруги на затискачах електроспоживачів:

$$Z_{\Delta U}(P_{\text{ген}}) = a_1 [\Delta U(P_{\text{ген}}) + a_2]^2 \frac{S_{\text{н}}}{S_{\text{нmax}}}, \quad (\text{A.3})$$

де $\Delta U(P_{\text{ген}})$ – значення усталеного відхилення напруги на затискачах електроспоживачів;

a_1, a_2 – постійні коефіцієнти, що визначаються якісним складом електроспоживачів;

$S_{\text{н}}$ – поточне значення повної потужності навантаження;

$S_{\text{нmax}}$ – максимальне значення повної потужності навантаження.

Надходження від генерації потужності в електромережу установками з ВДЕ по ставці «зеленого» тарифу визначаються наступним виразом:

$$P(P_{\text{ген}}) = c_0^{\text{СЕС}} P_{\text{ген}}^{\text{СЕС}} + c_0^{\text{ВЕС}} P_{\text{ген}}^{\text{ВЕС}} + c_0^{\text{БГЕ}} P_{\text{ген}}^{\text{БГЕ}}, \quad (\text{A.4})$$

де $P_{\text{ген}}^{\text{СЕС}}, P_{\text{ген}}^{\text{ВЕС}}, P_{\text{ген}}^{\text{БГЕ}}$ – потужність генерації СЕС, ВЕС, БГЕ відповідно;

$c_0^{\text{СЕС}}, c_0^{\text{ВЕС}}, c_0^{\text{БГЕ}}$ – ставки «зеленого» тарифу для електроенергії, що генерується СЕС, ВЕС та БГЕ відповідно.

Згідно з запропонованою методикою проведемо розрахунок затрат при генерації електроенергії ВДЕ в КЕЕС, принципова схема якої зображена на рис. А.1 для двох варіантів:

1. Для розробленої САК генерацією активної потужності ВДЕ;
2. Для базової САК генерацією активної потужності ВДЕ.

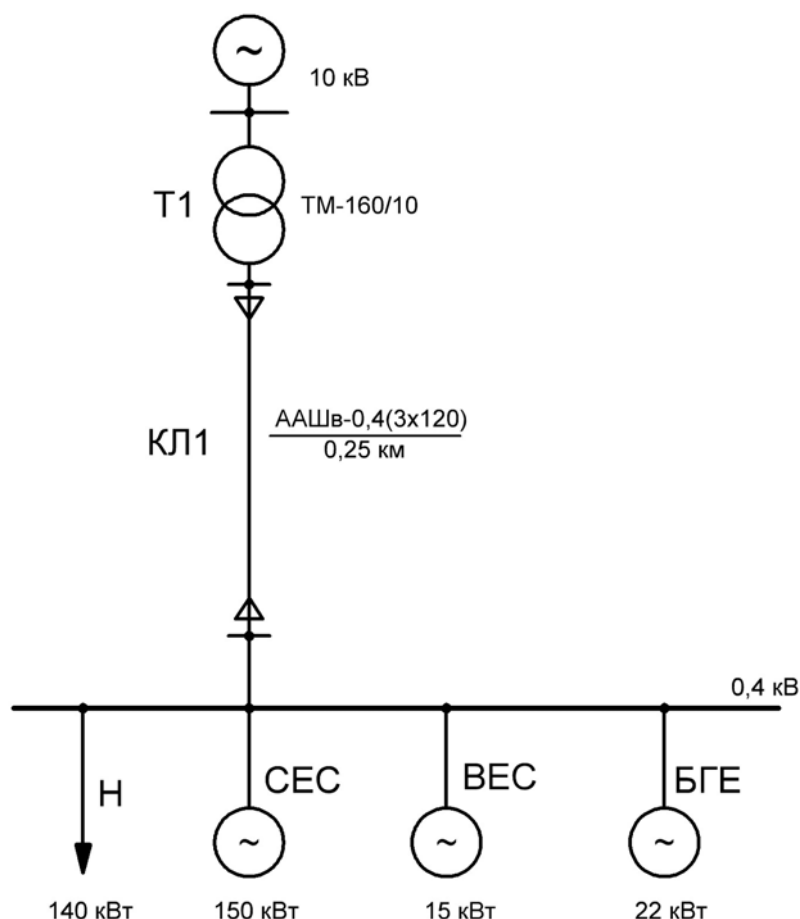


Рис. А.1. Принципова схема РЕМ з ВДЕ

В якості вихідних даних використаємо результати моделювання роботи САК, проведеного в розділі 3, а саме значення потужностей генерації електричної енергії установками з ВДЕ, значення спожитої електричної енергії та усталене значення відхилення напруги на шинах електроспоживачів.

Вихідні дані до розрахунку, а також результати розрахунків економічних збитків від понаднормових значень усталеного відхилення напруги для обох варіантів наведено в табл. А.1 – А.2.

Таблиця А.1. Вихідні дані до розрахунку економічної ефективності використання розробленої САК

№ з/п	Показник	Значення
1.	Електроенергія, що споживається електроспоживачами	51100
Базова модель САК		
2.	Електроенергія, що генерується СЕС, кВт*год.	359160
3.	Електроенергія, що генерується ВЕС, кВт*год.	30773,15
4.	Електроенергія, що генерується БГЕ, кВт*год.	185712
5.	Дохід від генерації електроенергії СЕС, грн.	1795800
6.	Дохід від генерації електроенергії ВЕС, грн.	61546,3
7.	Дохід від генерації електроенергії БГЕ, грн.	185712
8.	Сумарний дохід від генерації електроенергії, грн.	2043058,3
9.	Збиток від понаднормових значень усталеного відхилення напруги, грн.	9891,5
10.	Прибуток від генерації електроенергії ВДЕ, грн.	2039408,3
Розроблена модель САК		
11.	Електроенергія, що генерується СЕС, кВт*год.	366460
12.	Електроенергія, що генерується ВЕС, кВт*год.	30577,8
13.	Електроенергія, що генерується БГЕ, кВт*год.	183704,5
14.	Дохід від генерації електроенергії СЕС, грн.	1832300
15.	Дохід від генерації електроенергії ВЕС, грн.	61115,6
16.	Дохід від генерації електроенергії БГЕ, грн.	183704,5
17.	Сумарний дохід від генерації електроенергії, грн.	2077120,1
18.	Збиток від понаднормових значень усталеного відхилення напруги, грн.	32641,95
19.	Прибуток від генерації електроенергії ВДЕ, грн.	2065075,1

Таблиця А.2. Показники ефективності впровадження розробленої САК у порівнянні із базовою (результати розрахунку)

№ з/п	Показник	Одиниці виміру	Базова САК	Розробл. САК
1.	Капіталовкладення	тис. грн.	0	13,22
2.	Витрати на обслуговування та амортизацію	тис. грн./рік	0	1,98
3.	Сумарний дохід від генерації електроенергії	тис. грн./рік	2043,06	2077,12
4.	Збиток від понаднормових значень усталеного відхилення напруги	тис. грн./рік	9,8915	32,642
5.	Прибуток від генерації електроенергії ВДЕ	тис. грн./рік	2033,17	2044,48
6.	Приведені затрати	тис. грн.	9,8915	2,5455
7.	Економічний ефект	тис. грн.	7,346	
8.	Термін окупності	рік	1,8	

Очікуваний розрахунковий економічний ефект для розробленої САК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС складає 7,346 тис. грн. в рік, а термін окупності – 1,8 роки виявився меншим за нормативний (8 років), що свідчить про доцільність застосування запропонованої в роботі САК.

ДОДАТОК Б

Принципова електрична схема блоку автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

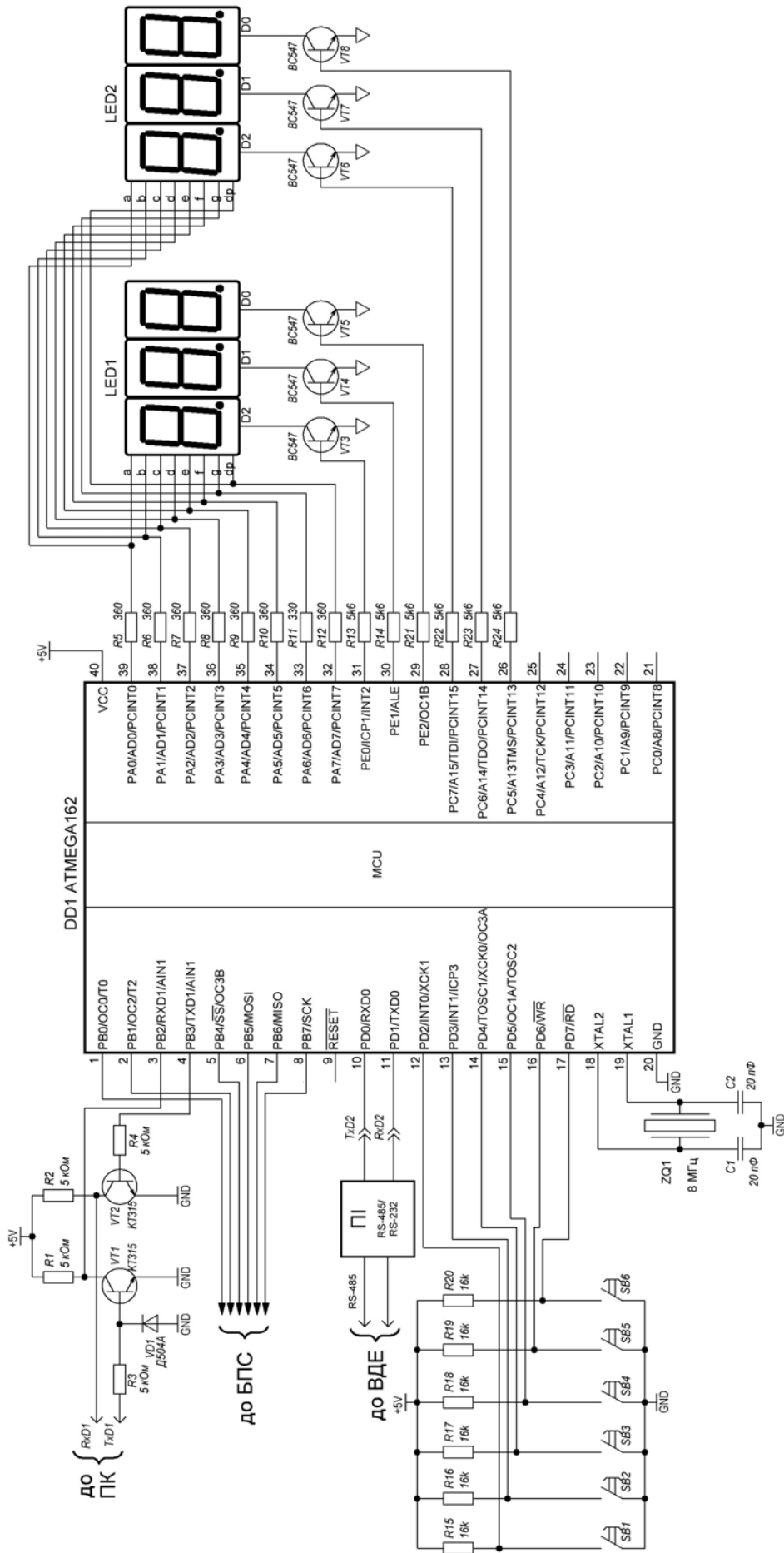


Рис. Б.1.1. Принципова електрична схема БАК генерацією активної потужності ВДЕ в КЕЕС

ДОДАТОК В

Принципова електрична схема блоку перетворення сигналів

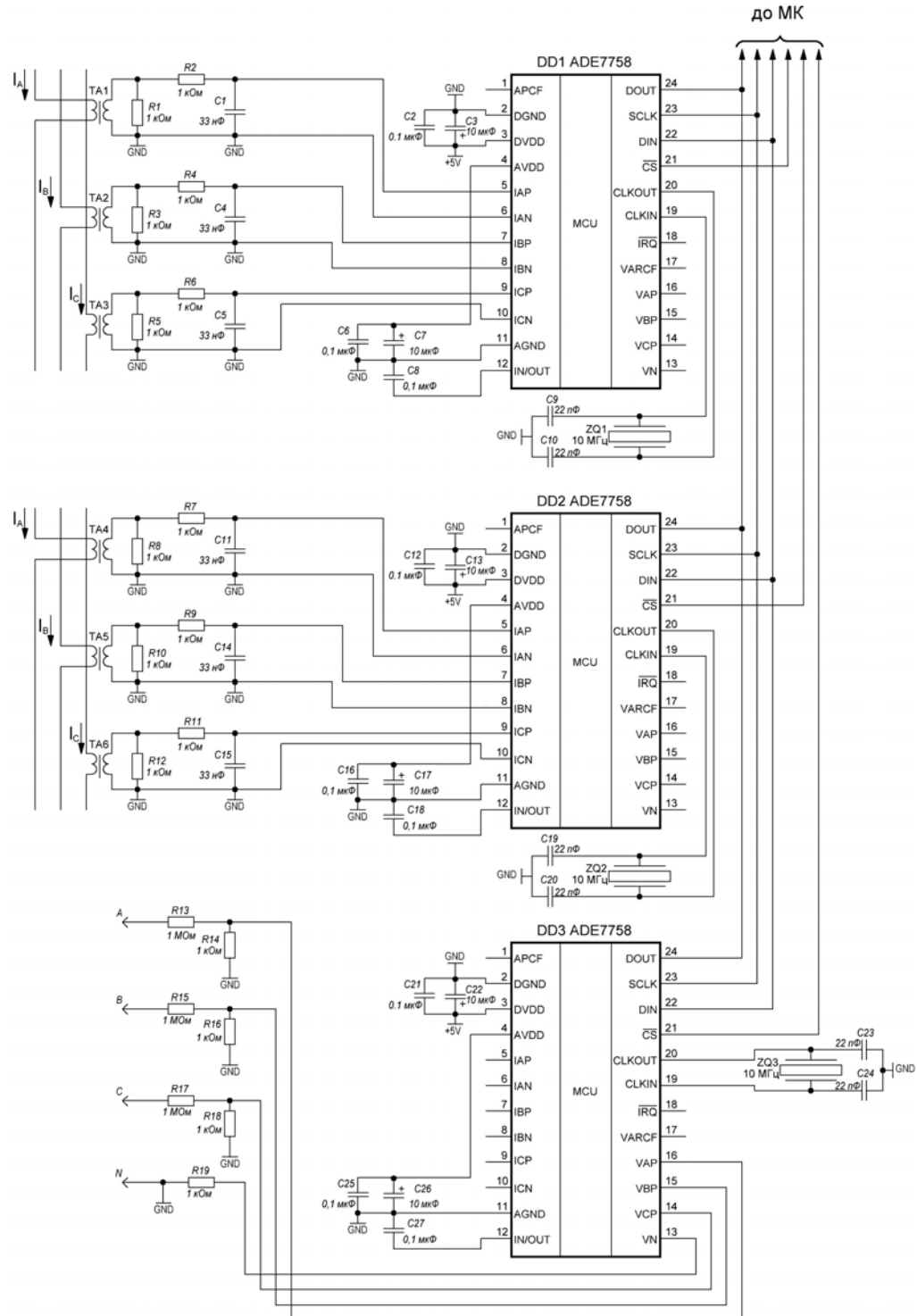
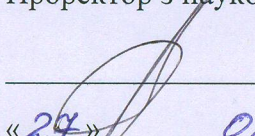


Рис. В.1. Принципова електрична схема блоку перетворення сигналів

ДОДАТОК Д

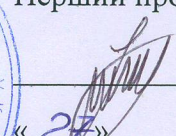
Акти впровадження

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор з наукової роботи


О. М. Левченко
«24» 02 2019 р.



«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Перший проректор


В. М. Кропівний
«24» 02 2019 р.

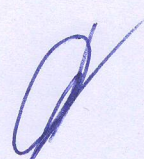
АКТ

про використання у навчальному процесі результатів дисертаційної роботи
Солдатенка Валентина Петровича
на тему «Автоматичне керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел
енергії в комбінованій електроенергетичній системі»

Акт складений у тому, що результати, отримані в дисертаційній роботі Солдатенка В.П на тему «Автоматичне керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі» використовуються в навчальному процесі на підставі рішення кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту ЦНТУ (протокол засідання кафедри ЕТС та ЕМ № 10 від 25 лютого 2019 року).

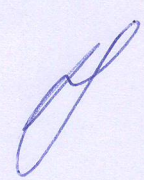
Результати використовуються при викладанні лекцій з курсу дисциплін «Автоматизація контролю та управління якістю електричної енергії» для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (освітньо-кваліфікаційний рівень магістр), та при проведенні практичних і лабораторних занять з курсу «Джерела енергії» для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр).

Завідувач кафедри
електротехнічних систем та
енергетичного менеджменту,
к.т.н., проф.



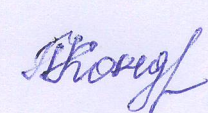
П. Г. Плешков

Декан факультету автоматики
та енергетики, к.т.н. проф.



Л. Г. Віхрова

Начальник навчального відділу



Л. І. Кондратець

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор

ТОВ «ЕЛЕКТРОАКТИВ-МОНТАЖ»



О. М. Дубовий

20 18 р.

АКТ**впровадження результатів дисертаційної роботи****Солдатенка Валентина Петровича****на тему: «Автоматичне керування генерацією активної потужності
відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній
системі»**

Комісія ТОВ «ЕЛЕКТРОАКТИВ-МОНТАЖ» у складі директора Дубового О.М. та проектного менеджера Горелової І.В. склала цей акт про те, що наукові результати, отримані у дисертаційній роботі Солдатенка В.П., використовуються в інженерній практиці ТОВ «ЕЛЕКТРОАКТИВ-МОНТАЖ», яка займається розробкою проектної документації та монтажем електричного обладнання та електроустановок, в тому числі і з використанням відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних електростанцій.

У практичній роботі ТОВ «ЕЛЕКТРОАКТИВ-МОНТАЖ» використовуються такі наукові результати, що були отримані дисертантом:

- комп'ютерні імітаційні моделі відновлюваних джерел енергії, що входять до складу комбінованої електроенергетичної системи;
- комп'ютерна імітаційна модель системи автоматичного керування установками, що виробляють електричну енергію з відновлюваних джерел;
- алгоритм визначення вектора оптимального керування установками з відновлюваними джерелами енергії.

Проектний менеджер
ТОВ «ЕЛЕКТРОАКТИВ-МОНТАЖ»

І.В. Горелова

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з наукової роботи
Центральноукраїнського національного
технічного університету



О. М. Левченко

«20» 03 2019 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник генеральний директор
ТДВ «Інтерресурси»



В. В. Ревука

«20» 03 2019 р.

АКТ

**про результати виробничих випробувань
системи автоматичного керування генерацією активної потужності відновлюваних
джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі**

Ми, що підписалися, заступник генерального директора ТДВ «Інтерресурси» Ревука В.В., головний інженер ТДВ «Інтерресурси» Шалов О.А., завідувач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту ЦНТУ, канд. техн. наук, проф. Плешков П.Г., викладач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту ЦНТУ, Солдатенко В.П. склали цей акт про те, що з 04.03.2019 р. по 18.03.2019 р. на виробничій базі підприємства ТДВ «Інтерресурси», що розташована в м. Кропивницький, були проведені виробничі випробування експериментального зразка системи автоматичного керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі.

Система автоматичного керування використовувалась для регулювання рівня генерації активної потужності в комбінованій електроенергетичній системі, до складу якої входили сонячна електростанція, вітрова електростанція та біогазова електростанція загальною потужністю 126,5 кВт.

Для проведення виробничих випробувань на кафедрі електротехнічних систем та енергетичного менеджменту було виготовлено дослідний зразок автоматичного регулятора. Реалізація алгоритму роботи програмного забезпечення системи автоматичного керування виконана на мові C із використанням засобу розробки програмного забезпечення для однокристальних мікроконтролерів AVR Studio. Для апаратної реалізації розробленої системи автоматичного керування було використано мікроконтролер типу Atmega162. Для вимірювання значень активної потужності, діючих значень комплексів напруг та струмів було застосовано мікросхему трьохфазного високоточного вимірювача параметрів електричної мережі ADE7758. Через інтерфейс RS-232 блок управління було з'єднано з персональним комп'ютером, за допомогою якого відбувалась архівація даних. В якості первинних перетворювачів струму використовувались трансформатори струму типу ТЛК-200/5 з класом точності 0,5. Керуючий вплив (значення поточного рівня генерації активної потужності кожної з установок ВДЕ) визначався шляхом виконання розробленого алгоритму керування, в основу якого покладено математичний апарат багатокритеріальної оптимізації. Візуалізація параметрів режиму та значень показників якості електричної енергії (усталеного відхилення трьохфазної напруги та усталеного відхилення фазних напруг) відбувалась за допомогою встановленого в блоці керування індикатора та на екрані персонального комп'ютера, для чого було розроблено відповідне програмне забезпечення.

За результатами виробничих випробувань було встановлено:

1. Апаратно-програмна реалізація системи автоматичного керування на базі мікроконтролера Atmega162 підтвердила працездатність і ефективність застосування одержаних алгоритмів керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі що дало можливість досягти максимально можливого рівня генерації активної потужності установками з відновлювальними джерелами енергії за умов дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів до розподільної електричної мережі.

2. Випробування дали змогу кількісно визначити збільшення рівня генерації активної потужності установками з ВДЕ та зменшення рівня усталеного відхилення напруги. Так, при застосуванні розробленої системи автоматичного керування рівень добової генерації активної енергії від установок з відновлювальними джерелами склав 473,16 кВт·год. Для порівняння, при застосуванні існуючої системи автоматичного керування рівень добової генерації активної енергії від установок з відновлювальними джерелами склав 426,8 кВт·год. При цьому, як для випадку існуючої системи автоматичного керування, так і для випадку розробленої системи інтегральна ймовірність значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів задовольняла вимогам ГОСТ 13109-97 і склали відповідно 100 % і 96,1 %. Проведені розрахунки показали, що очікуваний економічний ефект для запропонованої системи автоматичного керування генерацією активної потужності відновлювальних джерел енергії для підприємства ТДВ «Інтерресурси» склав 3,27 тис. грн. / рік.

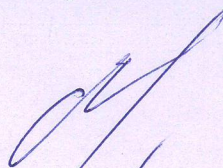
3. Поточна експлуатація розробленої системи автоматичного керування генерацією активної потужності відновлювальних джерел енергії не передбачає залучення оперативного персоналу. Програмування і налаштування здійснюється на стадії інсталяції обладнання, що створює передумови для її широкого впровадження.

Заступник генерального директора
ТДВ «Інтерресурси»

Головний інженер
ТДВ «Інтерресурси»

Завідувач кафедри електротехнічних
систем та енергетичного менеджменту
ЦНТУ, канд. техн. наук, проф.

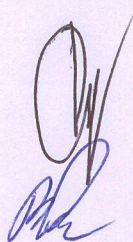
Викладач кафедри електротехнічних
систем та енергетичного менеджменту
ЦНТУ



Ревука В.В



Шалов О.А.

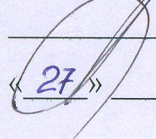


П. Г. Плешков



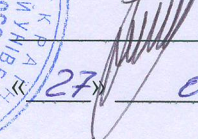
В.П. Солдатенко

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи

 О. М. Левченко
« 27 » 02 20 19 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор

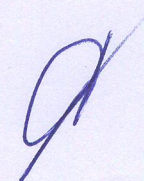
 В. М. Кропівний
« 27 » 02 20 19 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Акт складений у тому, що результати, отримані в дисертаційній роботі Солдатенка Валентина Петровича на тему «Автоматичне керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі», а саме комп'ютерні імітаційні моделі елементів комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії були використані у держбюджетній темі КПН 29Б110 «Розробка та дослідження комплексної електроенергетичної системи з використанням нетрадиційних та поновлювальних джерел енергії для сільськогосподарського виробництва» № ДР0110U002140.

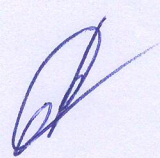
Завідувач кафедри електротехнічних
систем та енергетичного менеджменту,
к.т.н., проф.

« 25 » 02 20 19 р.

 П. Г. Плешков

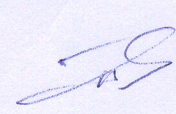
Відповідальний виконавець
д/б теми КПН 29Б110 №ДР0110U002140

« 25 » 02 20 19 р.

 П. Г. Плешков

Начальник науково-дослідного сектору

« 25 » 02 20 19 р.

 А. Б. Будулатій

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи

« 27 » 02 20 19 р. О. М. Левченко



ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор

« 27 » 02 20 19 р. В. М. Кропівний

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Акт складений у тому, що результати, отримані в дисертаційній роботі Солдатенка Валентина Петровича на тему «Автоматичне керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі», а саме математичні моделі оптимальних режимів вироблення та споживання електроенергії в комбінованій електроенергетичній системі з відновлюваними джерелами енергії були використані у науково-дослідній темі КПН 35Г213 «Оптимізація паливно-енергетичних балансів промислових та комунально-побутових об'єктів сільської місцевості з використанням альтернативних джерел енергії» №0113U007566.

Завідувач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, к.т.н., проф.

« 25 » 02 20 19 р.

П. Г. Плешков

Відповідальний виконавець
д/б теми КПН 35Г213 №0113U007566

« 25 » 02 20 19 р.

П. Г. Плешков

Начальник науково-дослідного сектору

« 25 » 02 20 19 р.

А. Б. Будулатій

ДОДАТОК Е

Список праць, опублікованих за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. **Солдатенко В.П.** Автоматичне керування режимами роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / **В.П. Солдатенко**, С.П. Плешков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №34 (1256). – С. 66-70 (Журнал індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РИНЦ, WorldCat і Google Scholar та включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory).

2. **Солдатенко В.П.** Система автоматичного керування роботою комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки. Вип. 187 Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2017. – С.37-39.

3. Плешков П.Г Оптимальне керування режимом роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / П.Г. Плешков, Н.Ю. Гарасьова, **В.П. Солдатенко** // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. Збірник наукових праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – №32 (1308). – С. 64-70 (Журнал індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РИНЦ, WorldCat і Google Scholar та включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory).

4. Электроснабжение сельскохозяйственных потребителей на базе комплексной электроэнергетической системы с использованием

возобновляемых источников энергии / П.Г. Плешков, С.П. Плешков, А.И. Котыш, **В.П. Солдатенко** // Електротехніка і електромеханіка, 2007. – №4. – С. 50 – 52.

5. 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 // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Вип. 87. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2009. – С. 24-26.

6. Вибір системи електропостачання з відновлювальними джерелами / Т.Г. Сабірзянов, П.Г. Плешков, М.В. Кубкін, **В.П. Солдатенко** // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки. Вип. 117. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2011 – С. 17–19.

7. Математична модель фотобатареї як джерела електричної енергії / Т.Г. Сабірзянов, М.В. Кубкін, **В.П. Солдатенко**, О.А. Козловський // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград: КНТУ, 2012. – Вип. 25, ч. 1. – С. 331-335.

8. **Солдатенко В.** Имитационная модель гибридной электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии / **В. Солдатенко**, М. Кубкин, Л. Вихрова // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. An International Journal on Operation of Farm and Agri-Food Industry Machinery – Lublin, 2014 – Vol. 16, №4 – P. 233-240. (Журнал індексується в наукометричній базі даних Index Copernicus).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

9. Плешков П.Г. Підвищення енергоефективності сільськогосподарського виробництва центрального регіону України на основі

комплексної електроенергетичної системи / П.Г. Плешков, **В.П. Солдатенко** // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: Матеріали П'ятої міжнародної науково-практичної конференції. Львів. 2-3 квітня. Зб. наук. статей. – Львів: ЛьвЦНТЕІ, – 2009. – С.51-55.

10 Сабірзянов Т. Г. Рекомендації по застосуванню даних про сонячну радіацію для сонячних установок в умовах Кіровоградського регіону / Т.Г. Сабірзянов, М.В. Кубкін, **В.П. Солдатенко** // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» 21-22 грудня 2010 року – Тернопіль: ТНТУ, 2010 – С. 119.

11. **Солдатенко В.П.** Автоматичне керування режимами роботи розподільної електричної мережі при наявності джерел розосередженої генерації / **В.П. Солдатенко** // Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції, 16-17 листопада 2017 р., Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – С. 88-90.

12. Плешков П.Г. Керування режимами роботи розподільної електричної мережі при наявності джерел розосередженої генерації / Плешков П.Г., **Солдатенко В.П.** // Прикладні науково-технічні дослідження (Appliennd scientific and technical research): Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції, 3-5 квітня 2018 р., Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2018.–С.71.

13. Плешков П.Г. Моделювання роботи системи оптимального керування режимом електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / Плешков П.Г., **Солдатенко В.П.** // Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві (АКІТ-2018): Матеріали

Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 15-16 листопада 2018 р., Кропивницький: ЦНТУ, 2018. – С. 103-104.

14. Плешков П.Г. Знаходження розв'язків задачі автоматичного керування режимом комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / Плешков П.Г., **Солдатенко В.П.**, Майборода С.О. // Перспективні напрямки інформаційних і комп'ютерних систем та мереж, комп'ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті: Матеріали Всеукр. науково-практичної інтернет конференції, 13-14 листопада 2018 р., Кропивницький: ЦНТУ, 2018. – С. 64.

*Опубліковані праці, які додатково відображають
наукові результати дисертації:*

15. Сабірзянов Т.Г. Методика вибору структури і складу систем електропостачання з відновлювальними джерелами / Т.Г. Сабірзянов, М.В. Кубкін, **В.П Солдатенко** // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград: КНТУ, 2011. Вип. 24, ч. 2. – С. 146-151.

16. Дослідження енергетичного потенціалу регіональних альтернативних джерел для оптимізації паливно-енергетичних балансів / П.Г. Плешков, М.В. Кубкін, К.Г. Петрова, та ін. // Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка. Технічні науки. Вип. 141 Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2013 – С. 54-57.

17. Пат. 71470 МПК H02J 3/00. Спосіб живлення споживачів електричної енергії від централізованої енергосистеми і відновлюваних джерел енергії / Кубкін М. В, **Солдатенко В. П.**, Сіріков О.І. Номер заявки u 201200725; заявл. 24.01.2012; опубл. 10.07.2012, Бюл. №13.