

Криворізький національний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ДОЗОРЕНКО ОЛЕГ ВІКТОРОВИЧ

УДК 621.316.11

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ТЕРИТОРІАЛЬНО ВІДДАЛЕНИХ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ
ЕНЕРГІЇ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ КОМБІНАТІВ**

141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ О. В. Дозоренко

Науковий керівник: Сінчук Ігор Олегович, кандидат технічних наук, доцент

Кривий Ріг – 2022

АНОТАЦІЯ

Дозоренко О. В. Енергоефективна система електропостачання територіально віддалених споживачів електричної енергії гірничо-збагачувальних комбінатів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2022.

Електроенергетика в структурі існуючої системи видобутку та збагачення залізної руди являє собою домінанту в формуванні собівартості технологічного переділу вищезазначеного виду корисних копалин, котрий у значній мірі формує ВВП і щорічно, за рахунок експортних поставок, поповнює валютні запаси держави на 60-70%. Недопущення втрати такого системоутворюючого впливу рівня позитиву на структуру формування економіки держави – завдання надзвичайно важливе, тим паче в умовах сучасного стану України.

У такому варіанті кінцевого рішення завдання є актуальним і має свою багатовекторну реалізацію. При цьому всі сегменти в досягненні мети повинні бути спрямовані на зменшення важелів впливу електроенергетичного «тягаря» на рівень оптимізації економічних параметрів функціонування гірничодобувних підприємств.

Мета досліджень. Розробка теоретичних аспектів і практичних рішень щодо підвищення енергоефективності електропостачання територіально віддалених споживачів енергії гірничо-збагачувальних комбінатів шляхом упровадження в структури систем їх електропостачання автономних джерел енергії на основі вітрових генеруючих установок з енергоефективними функціональними характеристиками електромеханічних комплексів.

Особливістю і водночас специфікою спрямованості даного дослідження в контексті виконання дисертаційної роботи є те, що об'єкти споживання електричної енергії гірничо-збагачувальних комбінатів розташовані на значних відстанях від головної понижувальної підстанції підприємств (15-25 км), що, по-перше, є причиною значних втрат електричної енергії та низької надійності (безпростійності) лінії електропередач, котрі живлять ці об'єкти. Останнє пов'язано з тим, що лінії електропередач для споживачів шламосховищ і відвалів являють собою не стаціонарні, а пересувні види, що відповідно їх примітивній конструкції та значній протяжності, значно впливає на стабільність їх функціонування.

По-друге, території, як відвалів, так і шламосховищ, являють собою площі, котрі законодавчо виведені із землекористування, і спорудження там вітрогенеруючих установок не зашкодить стану екології цих місць.

По-третє, як правило, на незначних відстанях від відвалів і шламосховищ знаходяться історично існуючі там місцеві поселення, котрі також віддалені від магістральних електромереж, а створення нових генеруючих потужностей може задовольняти при необхідності і їхні потреби в електричній енергії.

Між тим, сам факт застосування вітрових енергогенеруючих станцій, як автономних джерел електроенергії, не є новим науковим доробком, проте рівень ефективності їх функціонування, що забезпечується формуванням відповідної структури та робочих характеристик їх електромеханічних систем з урахуванням необхідності та оптимізації режимів роботи установок, як у варіанті поодинокого, так і комплексного використання в локальній електроенергетичній системі, формує новий підхід до методології цього дослідження з очікуванням нових сучасного технічного й економічного спрямувань рішень.

Проте досягнення бажаного рівня ефекту від вищенаведених заходів не гарантує достатнього використання енергетичного потенціалу від цього

впровадження. Важливим системоутворюючим моментом наукового рішення є обґрунтування, вибір та оцінювання очікуваного ефекту як від варіантів структур вітроенергетичних комплексів у локальній системі електропостачання, а і, що не менш важливо, розробка відповідного алгоритму варіативності функціонування електромеханічних комплексів цих установок з урахуванням як поодинокого функціонування, так і в складі об'єднаного енергетичного комплексу.

У роботі отримані наступні **наукові результати**:

- отримала подальший розвиток методика визначення енергетичних характеристик вітроенергетичних установок у залежності від локації вітроенергетичних установок в структурі систем електропостачання гірничо-збагачувальних комбінатів та конфігурації розташування на мапі гірничих виробок;

- встановлено залежності електроенергетичних параметрів вітроенергетичних установок як в одиночному, так і комплексному варіантах для умов їх функціонування в складі систем електропостачання гірничо-збагачувальних комбінатів, що дозволяє отримати і максимально реалізувати їх енергетичний потенціал;

- встановлено залежність енергетичних параметрів функціонування електромеханічних систем вітроенергетичних установок від індивідуальних конструктивних показників складових автономного генеруючого комплексу, що дає можливість змінювати режими роботи вищезазначених комплексів у залежності від необхідного рівня енергоспоживання та вітрової ситуації в місці їх дислокації.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає:

- в обґрунтуванні та оцінюванні доцільності застосування отриманих результатів для впровадження вітроенергетичних установок у комплексі автономних локальних систем генерації електричної енергії в умовах розподільчих мереж залізрудних підприємств з метою підвищення

енергоефективності електропостачання споживачів гірничо-збагачувальних комбінатів шляхом зменшення втрат електроенергії та надійності функціонування розподільчих електромереж підприємств – сегментах систем живлення віддалених споживачів електричної енергії для зниження собівартості видобутку корисних копалин;

– розробці варіанту архітектури функціонування вітроенергетичної станції з комплексом вітроенергетичних установок, що забезпечує потрібну стійкість до накидів напруги при імпульсному збільшенні рівнів навантаження на лопасті вітрогенераторів і виникнення коротких замикань у даному комплексі;

– розробці авторського варіанту енергоефективного електромеханічного комплексу вітроенергетичної станції для використання у структурах електричних мереж із розосередженою генерацією електричної енергії гірничо-збагачувальних комбінатів.

Використання комплексу запропонованих нововведень у практику роботи гірничо-збагачувальних комбінатів, згідно оцінки експертів відповідних спеціалізованих підприємств, дозволить отримати очікуваний економічний ефект – близько 10 млн. грн., у тому числі зменшення споживання електричної енергії близько 10 ГВт·рік від загального обсягу споживання.

Структура дисертаційної роботи. Робота містить 4-и розділи, перелік використаних літературних джерел та Додатки.

У розділі 1 розглянуто загальні питання до вибору типу джерел генерації електричної енергії для умов гірничих підприємств із відкритим способом видобутку залізорудної сировини. Наведено загальний аналіз та особливості вітрового потенціалу в умовах гірничо-збагачувальних комбінатів України. Сформовано мету та завдання наукового пошуку.

У розділі 2 наведено загальну характеристику систем електропостачання типового вітчизняного гірничо-збагачувального

комбінату. Форматизовано особливості розміщення вітроенергетичних станцій на відвалах і шламосховищах, а також фактори впливу на основні енергетичні показники вітроенергетичних станцій в умовах залізрудних підприємств.

У розділі 3 розроблено структуру електромеханічного комплексу вітроенергетичної станції та форматизовано алгоритм функціонування системи керування електротехнічним комплексом вітроенергетичної станції для умов гірничо-збагачувальних комбінатів.

У розділі 4 проведено модельні дослідження можливих режимів функціонування електромеханічних комплексів вітроенергетичних установок в умовах гірничо-збагачувальних комбінатів. Проведено моделювання прогнозу генерації електроенергії вітроенергетичною станцією.

Ключові слова: електрична енергія, електромеханічні комплекси, системи електропостачання, гірничо-збагачувальні комбінати, вітроенергетична установка, генерація, енергоефективність.

ABSTRACT

Dozorenko O. V. Energy-efficient power supply system of territorially remote power consumers of mining and processing integrated works. – Manuscript qualification work.

Thesis for a Doctor of Philosophy degree in Engineering. Specialty 141 «Electric Power Engineering, Electrotechnics and Electromechanics». – Kryvyi Rih National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kryvyi Rih, 2022.

In the existing system of iron ore mining and processing, electric power is the dominant in setting the cost of the above-mentioned type of minerals, largely forming the country's GDP and annually replenishing its foreign currency reserves by 60-70% due to export supplies. Thus, it is essential to prevent the loss of such a system-forming impact on formation of the state economy structure, especially in the current state of Ukraine.

The given option of the final solution of the problem is perceived relevant and has multi-vector implementation. At the same time, all components in achieving this should be aimed at reducing the power «burden» on the level of optimization of economic parameters of mining enterprises.

The research aims to develop theoretical aspects and practical solutions for improving energy efficiency of power supply to territorially remote power consumers of mining and processing integrated works by introducing autonomous energy sources into structures of their power supply systems based on wind generating plants with energy-efficient functional characteristics of electromechanical complexes.

The research is distinguished by the fact that power consumers of mining and processing enterprises are located at considerable distances from the main stepdown substation of the enterprises (15-25 km), which, firstly, is the cause of significant losses of power and low reliability (standstill) of transmission lines feeding these

objects. The latter is due to the fact that transmission lines for consumers of tailing ponds and waste dumps are not stationary, but mobile, while their primitive design and significant lengths greatly affect stability of their functioning.

Secondly, both waste dumps and tailing ponds are located in the areas legally allocated and construction of wind turbines there will not contaminate the environment.

Thirdly, at insignificant distances from waste dumps and tailing ponds, there are usually historically existing local settlements, which are also remote from the main power grids, and creation of new generating facilities can satisfy their need for electricity, if necessary.

Meanwhile, the very fact of using wind power generating plants as autonomous sources of energy is not a new scientific development. Yet, efficiency of their functioning, which is ensured by formation of an appropriate structure and performance characteristics of their electromechanical systems, taking into account the need to optimize their operation modes both in case of single and integrated use in the local power grid calls for a new approach to developing research methods targeting new up-to-date engineering and economic solutions.

However, achievement of the desired effect from the above measures does not guarantee sufficient use of the energy potential after implementation. Substantiation, selection and assessment of the expected effect from options with wind power plants incorporated in the local power supply system is an important system-forming moment of the scientific solution. No less important is to develop an appropriate algorithm for variable functioning of electromechanical complexes of these plants, considering both single and integrated functioning modes.

The research work contains the following **scientific results** achieved:

- the method of determining the energy characteristics of wind power plants was further developed depending on the location of wind power plants in the structure of power supply systems of mining and beneficiation plants and the configuration of the location on the mine enterprises map;

- the dependencies of the electric energy parameters of wind power plants in both single and complex versions for the conditions of their operation as part of the power supply systems of mining and beneficiation plants were established, which allows obtaining and maximally realizing their energy potential;

- the dependence of the energy parameters of the functioning of the electromechanical systems of wind power plants on the individual design indicators of the components of the autonomous generating complex was determined, which makes it possible to change the operating modes of the above-mentioned complexes depending on the required level of energy consumption and the wind situation at their location.

Practical significance of the research results involves:

- substantiating and evaluating feasibility of applying the obtained results to introduction of wind power plants in autonomous local power generating systems of distribution grids at iron ore mining enterprises in order to increase energy efficiency of power supply to consumers of mining and processing integrated works by reducing power losses and improving reliability of power distribution grids of enterprises - segments of power supply systems of remote power consumers, thus reducing ore mining costs;

- developing an option of the wind power plant architecture including a complex of wind power facilities, which provides necessary resistance to load surges on wind turbine blades and short circuits in this complex;

- developing the author's option of the energy-efficient electromechanical complex of wind power plants to be used in power grids with distributed power generation at mining and processing integrated works. According to the experts of relevant specialized enterprises, application of proposed innovations to activities of mining and processing integrated works will enable the expected economic effect of about 10 million UAH, including reduction of power consumption of about 10 GW per year of total consumption.

The thesis comprises four sections, a list of references and Annexes.

Section 1 deals with general issues of selecting a type of power generation sources at ore mining enterprises with an open pit mining method of iron ore extraction. General analysis and features of wind power potential at mining and processing integrated works of Ukraine are presented. The research aim and objectives are formed.

Section 2 shows general characteristics of power supply systems of a typical Ukrainian mining and processing integrated works. Peculiarities of locating wind power plants at tailing ponds and waste dumps, as well as factors influencing basic power consumption indices of wind power plants at iron ore mining enterprises are formatted.

Section 3 formats an algorithm for the control system functioning for the power engineering complex of a wind power plant.

Section 4 model studies of possible modes of operation of electromechanical complexes of wind power plants in the conditions of mining and processing integrated works were carried out. Modeling of the forecast of electricity generation by the wind power plants was carried out.

Keywords: power, electromechanical complexes, power supply systems, mining and processing integrated works, wind power, generation, energy efficiency.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

I. Статті

1. С. М. Бойко, І. О. Сінчук, А. П. Сінолиций, Є. О. Несмашний, О. В. Дозоренко. Особливості прогнозування рівнів енергоспоживання в умовах розподільчих електричних мереж залізрудних підприємств / Гірничий вісник: науково-технічний збірник. – Кривий Ріг, 2019. – Вип. 105. – С. 24–29. <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2019-1-105-24-29>.

2. Сінчук О. М., Сінчук І. О., Дозоренко О. В. Діагностика та прогнозування рівнів електроспоживання залізрудних копалень. Мікросистеми, електроніка та акустика. Національний технічний університет України «КПІ». 2019. Том. 24, № 2 (109). С. 25–32. <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2019.24.2.169731>.

3. І. О. Сінчук, С. М. Бойко, І. В. Касаткіна, О. В. Дозоренко. Аспекти розвитку вітроенергетики в умовах залізрудних підприємств // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2021. – Вип. 52. – С. 70–76. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-52-70-77>.

4. Sinchuk, O., Sinchuk, I., Beridze, T., Filipp, Y., Budnikov, K., Dozorenko, O., & Strzelecki, R. (2021). Assessment of the factors influencing on the formation of energy-oriented modes of electric power consumption by water-drainage installations of the mines. Mining of Mineral Deposits, 15(4), 25-33. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.025>.

5. Сьомочкин А. Б. До форматизації варіантів керування вітроелектричною установкою / А. Б. Сьомочкин, О. В. Дозоренко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2022. – Вип. 1/2022 (57). – С. 46-54. <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.1.57.46-54>.

II. Тези

1. Дозоренко О. В., Краснопольський Р. І. Штрихи до проблеми використання повітряних потоків підземних виробок залізрудних шахт для

мікроелектростанцій // Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності підприємств ГМК: збірник наукових праць VI Міжнародної науково-технічної конференції. – Кривий Ріг: Р. А. Козлов, 2019. – С. 100.

2. Сінчук І. О., Дозоренко О. В. Аналіз вітрового потенціалу підприємств гірничодобувної галузі криворізького залізорудного басейну. Збірник праць всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Новітні технології у науковій діяльності та навчальному процесі. НУ «Чернігівська політехніка», 2021.

3. Сінчук О. М., Бойко С. М., Федотов В. О., Дозоренко О. В. До питання формування енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації електричної енергії гірничорудних підприємств. Розвиток промисловості та суспільства, КНУ, 2021.

4. Дозоренко О. В., Сьомочкин А. Б. Особливості роботи вітроенергетичної установки з асинхронним генератором з ємнісним збудженням. Всеукраїнська науково-практична конференція «актуальні питання гірничо-металургійного виробництва»: збірник тез доповідей. / Кривий Ріг: КНУ, 2021.

III. Патенти

1. О. Сінчук, С. Бойко, О. Дозоренко, та В. Демків. Пристрій для електротехнічного комплексу електропостачання підприємства з вітроенергетичними установками: пат. 121291 Україна: H02J 3/38 (2006.01), H02J 9/04 (2006.01). № u 2017 06756; заявл. 29.06.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22. 4 с.

IV. Науково-дослідні роботи

1. І. О. Сінчук, І. В. Касаткіна, Ю. Б. Філіпп, Ю. Г. Осадчук, А. Б. Сьомочкин, І. А. Козакевич, В. О. Федотов, Д. О. Кальмус та І. І. Пересунько «Аспекти теорії та практики оцінки електроенергетичної

конкурентоспроможності залізорудних підприємств», ДВНЗ «КНУ», Кривий Ріг, Україна, № 0118U006520, 2020.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	19
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА ОЦІНЮВАННЯ ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ В СТРУКТУРАХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	29
1.1 Загальні питання до доцільності застосування автономних джерел генерації електричної енергії в структурах систем електропостачання гірничих підприємств з відкритими способами видобутку залізорудної сировини.....	29
1.2 Загальний аналіз вітрового потенціалу в умовах гірничо- збагачувальних комбінатів України.....	33
1.3 Топологія гірничовидобувних підприємств з поглядом на можливість застосування в їх електроенергетиці автономних джерел енергії.....	36
1.4 Превентивний аналіз режимів роботи вітроенергетичних установок у варіанті функціонування в структурі електромереж з розподільчою генерацією електричної енергії в умовах гірничорудних підприємств.....	40
1.5 Аналіз експлуатованих систем електропостачання гірничо- збагачувальних комбінатів. Стан. Проблеми. Перспектива.....	50
1.6 Особливості підключення вітроенергетичних станцій до електричних мереж гірничорудних підприємств.....	54
1.7 Аналіз існуючих рішень систем керування вітроенергетичними установками та вітроенергетичними станціями.....	60
1.8 Формування мети та завдань наукового пошуку.....	62
1.9 Висновки до розділу 1.....	64

РОЗДІЛ 2. БАЗОВІ ЗАСАДИ ДО ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАНЦІЙ В УМОВАХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	66
2.1 Узагальнена характеристика систем електропостачання типового вітчизняного гірничо-збагачувального комбінату.....	66
2.2 Електропостачання віддалених споживачів електричної енергії гірничо-збагачувальних комбінатів та оцінювання можливостей і варіантів включення в їх структури автономних джерел енергії.....	71
2.3 Визначення факторів впливу на основні енергетичні показники вітроенергетичної станції в умовах залізорудних підприємств.....	76
2.4 Особливості роботи варіантів вітроенергетичних генераторів електричної енергії з потужною мережею електропостачання- електроспоживання підприємства.....	81
2.5 Особливості роботи вітроенергетичної станції у варіантах розподільчих електричних мереж гірничорудних підприємств.....	85
2.6 Аналіз існуючих підходів до прогнозування рівнів генерування вітроенергетичною станцією в розподільчих електричних мережах залізорудних підприємств.....	93
2.7 Висновки до розділу 2.....	97
РОЗДІЛ 3. РОЗБУДОВА АРХІТЕКТУРИ ТА ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК В УМОВАХ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ КОМБІНАТІВ.....	98
3.1 Особливості розміщення вітроенергетичних станцій на відвалах та шламосховищах в умовах залізорудних підприємств.....	99
3.2 Загальні питання до обґрунтування вибору структури електромеханічного комплексу вітроенергетичної установки.....	103

3.3	Розробка структури електромеханічного комплексу вітроенергетичної станції для умов гірничо-збагачувальних комбінатів.....	111
3.4	Форматизація алгоритму функціонування системи керування електротехнічного комплексу вітроенергетичної станції.....	114
3.5	Висновки до розділу 3.....	116
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК.....		118
4.1	Обґрунтування вибору асинхронного генератора для електротехнічних комплексів вітроелектростанції.....	118
4.2	Розробка структури та моделі одиночної вітроенергетичної установки з асинхронним генератором з ємнісним збудженням...	119
4.2.1	Дослідження динаміки одиночної вітроенергетичної установки з асинхронним генератором з ємнісним збудженням в автономному режимі.....	121
4.2.2	Дослідження динаміки одиночної вітроенергетичної установки з асинхронним генератором з ємнісним збудженням разом з енергосистемою.....	127
4.3	Аналіз процесу функціонування електромеханічних систем вітроенергетичних установок із включенням у їх структуру конденсаторних батарей.....	130
4.4	Дослідження режимів одиночної вітроенергетичної установки при короткочасних коротких замиканнях із системою зовнішнього електропостачання та без неї.....	132
4.5	Розробка моделі автономної вітроенергетичної станції з паралельно працюючими в комплексі вісьмома вітрогенеруючими агрегатами.....	137

4.6	Дослідження пуску вітроенергетичної установки в складі автономної вітроенергетичної станції.....	140
4.7	Автоколивання частоти в автономній системі вітроенергетичної станції.....	144
4.8	Розробка структури моделі вітроенергетичної станції разом із зовнішньою енергосистемою. Прямий пуск асинхронного генератора в систему.....	145
4.9	Дослідження впливу коротких замикань на режим вітроенергетичної установки разом з енергосистемою.....	148
4.10	Моделювання прогнозу генерації електроенергії вітроенергетичною станцією в умовах гірничо-збагачувальних комбінатів.....	149
4.11	Висновки до розділу 4.....	157
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	159
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	162
	ДОДАТКИ.....	178
	Додаток А. Огляд стану вітрових енергетичних ресурсів України.....	179
	Додаток Б. Фізичні основи генерування електричної енергії вітроенергетичними установками.....	189
	Додаток В. Схеми електропостачання шламового господарства.....	197
	Додаток Г. Обґрунтування вибору потужності вітроенергетичної станції в умовах відвалів гірничо-збагачувальних комбінатів.....	202
	Додаток Д 1. Вибір параметрів електротехнічного обладнання вітроенергетичної станції для умов гірничо-збагачувальних комбінатів.....	208
	Додаток Д 2. Розрахунок витрат на розробку системи живлення від вітроенергетичної станції.....	214
	Додаток Д 3. Розрахунок витрат на експлуатацію вітроенергетичної станції.....	219

Додаток Д 4. Розрахунок обсягів генерування електричної енергії.....	222
Додаток Е. Розрахунок економічного ефекту від впровадження вітроенергетичної станції.....	225
Додаток Є. Список публікацій за темою дисертації.....	233
Додаток Ж. Апробація матеріалів дисертації.....	236
Додаток З. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	238

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕЕ – електрична енергія
АГ – асинхронний генератор
СГ – синхронний генератор
АКБ – акумуляторна батарея
ВДЕ – відновлювальні джерела енергії
ДРГ – джерела розосередженої генерації
ВЕУ – вітроенергетична установка
ВЕК – вітровий електротехнічний комплекс
ВЕС – вітроенергетична станція
ЛЕП – лінія електропередач
ГЗК – гірничо-збагачувальний комбінат
КВЕВ – коефіцієнт використання енергії вітру
КЗ – коротке замикання
ККД – коефіцієнт корисної дії
СК – система керування
РЕМ – розподільча електромережа підприємства
УВЕУ – українська вітроенергетична асоціація
ГПП – головна понижуюча підстанція
КРП – комплектний розподільчий пристрій
АВР – автоматичне включення резерву
РП – розподільчий пристрій
СЕ – система електропостачання
ЗР – залізна руда
ЗРС – залізорудна сировина

ВСТУП

Більше 50% загальнопромислового обсягу споживання електричної енергії в Україні припадає на підприємства гірничо-металургійної галузі [1–3].

Саме ці підприємства відносяться до категорії енергоємних [4–5], як наслідок такої ситуації є факт збільшення електроенергетичного сегменту в комплексі собівартості видобутку залізорудної сировини – базового продукту України у формуванні ВВП та валютних надходжень до казни держави. Таким чином, можна констатувати, що проблема підвищення електроенергоєфективності гірничовидобувних підприємств це проблема державного рівня [6–8].

Актуальність досліджень

Гірничовидобувні підприємства взагалі та гірничорудні, зокрема, являють собою типові зразки енергоємних видів підприємств. Більше 80% від усього обсягу електроенергії цих підприємств споживають приймачі напругою живлення 6-10 кВ. В той же час на підприємствах гірничорудної галузі, а саме: на підприємствах з відкритим способом видобутку залізорудної сировини: кар'єри – збагачувальні фабрики, функціонує значна кількість споживачів із рівнем напруги живлення 0,4-0,22 кВ. Більшість таких споживачів функціонують на відвалах (складах) пустих порід і шламосховищах технологічного переділу збагачувальних фабрик.

Цей значний енергоспоживчий комплекс знаходиться в радіусі близько 20-25 км від місць дислокації максимально наближених до них головних понижуючих підстанцій підприємств. Загальна упосереднена протяжність таких ліній електропередач по окремо взятому гірничо-збагачувальному комбінаті складає 100-150 км [9]. В такому варіанті структур електропостачання існують невиправдані втрати електричної енергії та часті

виходи з ладу локальних мереж, як правило, таких, що монтуються в нестационарних (пересувних) видах повітряних ліній електропередач [10].

Тому, логічно, враховуючи потужності таких територіально віддалених споживачів, жити їх від автономних джерел енергії, які будуть розташовуватись у максимальному до них територіальному наближенні.

Ця теза набирає більшого позитиву, враховуючи факт значних площ відвалів і шламосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів, які тільки в загальному масштабі Криворізького залізничного басейну (5 гірничо-збагачувальних комбінатів і 8 шахт-рудників) займають площі в десятки тисяч га з проєктними висотами над рівнем земної поверхні 100-150 м. Ці площі землі законодавчо на рівні держави виведені із землекористування і в більшості своїй не підлягають рекультивації та формально являють собою фактично «підготовлені» майданчики для розміщення на них автономних відновлювальних джерел живлення: таких, як сонячні, гідро- та вітрогенеруючі установки (станції). В даному науковому пошуку, згідно превентивного оцінювання енергетичного потенціалу вищезгаданих джерел генерації електричної енергії, зупинимось на варіанті вітроенергетичних установок (комплексів).

У такому ракурсі існуючої проблеми логістика розбудови схеми наукового пошуку постає як двоєдине завдання створення в структурі єдиної системи електропостачання підприємства автономної енергоефективної інфраструктури локальної системи електропостачання із включенням в неї комплексу вітроенергетичної станції з автоматичною оптимізацією режимів функціонування її складових – вітроенергетичних установок, та форматизації оптимального ландшафту їх дислокації на площах відвалів і шламосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів.

Обґрунтування вибору теми дослідження

Гірничорудні підприємства взагалі та гірничозбагачувальні комбінати, зокрема, є споживачами електроенергії, які класифікуються як енергоємні [4, 6].

У зв'язку з цим фактом, а також з тенденцією стабільного зростання ціни за спожиту електроенергію, собівартість видобутку залізорудної сировини зростає, що без прийняття енергоефективних заходів може призвести до втрати конкурентоспроможності даного виду вітчизняної продукції на світовому ринку сировини. Такий факт приведе до катастрофічних наслідків в економіці як самих гірничорудних підприємств, так і держави в цілому.

Як встановлено [11–12], основним сегментом комплексу собівартості видобутку залізорудної сировини є енергетична складова, де, в свою чергу, домінує електроенергетична, яка для вітчизняних гірничо-збагачувальних комбінатів у 2021 році сягнула позначки в середньому 27-32%. Зрозуміло, що такий стан справ треба змінювати.

Одним із сучасних і теоретично обгрунтованих спрямувань шляхів зменшення енергетичного процесу на собівартість видобутку залізорудної сировини є зміна структур систем електропостачання з варіанту централізованого живлення – від енергосистем, до змішаного – централізованого та від особистих автономних джерел живлення [11]. В такому варіанті систем електропостачання трансформуються в структури електропостачання із розосередженою генерацією електроенергії [13].

Водночас з економічною частиною актуальним питанням електропостачання підприємств гірничовидобувної галузі є підвищення їх надійності та безперебійності. Тому і в такому форматі актуальним є впровадження в системи розподіленої генерації даних видів підприємств додаткових дублюючо-резервних джерел електричної енергії.

Для цього на основі наукового обгрунтування необхідно визначити та оцінити доцільність: які саме автономні джерела, з якими енергетичними параметрами і де ці джерела достатньо ефективно використовувати.

Реально, як ні в яких інших видах промислових підприємств, є можливість використання енергії вітрових потоків, що існують в концентрованому варіанті на відвалах кар'єрів і шламосховищах підприємств гірничо-видобувного комплексу [14].

Тільки у породних відвалах Кривбасу на період 2020 року заскладовано більше 14 млрд. т розкривних порід. Хвостосховища гірничо-збагачувальних комбінатів тільки Кривого Рогу займають площі близько 6 тис. га, а відвали пустих порід – 2 млн. га. На сьогоднішній день жоден із відвалів гірничо-збагачувальних комбінатів не рекультивовано, оскільки підприємства вважають це економічно недоцільним, адже рекультивація 1 га відвальних порід коштує 60-70 тис. доларів США. Тобто, як резюме, потрібно розуміти, що ці площі назавжди виведені із земельного обороту і не несуть перспективи їх вторинного використання для землекористування в подальшому. Тобто, по факту, це площі, які вже у своїй логіці готові для розбудови на них вітрогенеруючих систем.

Якщо розглядати ідею застосування вітроенергетичних станцій в умовах кар'єрів як результат розвитку теорії впровадження і функціонування вітроенергетичних станцій у складі розподільчої електромережі залізрудних підприємств, то це дозволить покласти початок модернізації живлячої мережі цих підприємств і, як наслідок, зменшити собівартість видобутку корисних копалин.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Основний зміст роботи базується на результатах досліджень, що проводились і проводяться на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті Криворізького національного університету у відповідності до наукового напрямку «Розроблення комплексу заходів по енергозбереженню на підприємствах залізрудної промисловості». Дисертаційна робота виконувалася також відповідно до «Програми наукових досліджень і розробок Міністерства освіти і науки України за пріоритетними

напрямами розвитку науки та техніки» у рамках науково-дослідних робіт № 30-114-21 «Інтеграція розумних технологій побудови електроенергетичних систем у контексті підприємств гірничо-металургійної галузі». Результати дисертаційної роботи одержано під час виконання НДР «Аспекти теорії та практики оцінки електроенергетичної конкурентоспроможності залізрудних підприємств» (№ НДР 0118U006520).

Мета і завдання дослідження. *Метою роботи є розробка теоретичних аспектів і практичних рішень щодо підвищення енергоефективності електропостачання територіально віддалених споживачів енергії гірничо-збагачувальних комбінатів шляхом упровадження в структури систем їх електропостачання автономних джерел енергії на основі вітрових генеруючих установок з енергоефективними функціональними характеристиками електромеханічних комплексів.*

Для досягнення мети були поставлені та вирішені наступні наукові завдання:

- розвинути методику визначення енергетичних характеристик вітроенергетичних установок в залежності від локації вітроенергетичних установок у структурі систем електропостачання гірничо-збагачувальних комбінатів і конфігурації розташування на мапі гірничих виробок;

- встановити залежності електроенергетичних параметрів вітроенергетичних установок як в одиночному, так і комплексному варіантах для умов їх функціонування у складі систем електропостачання гірничо-збагачувальних комбінатів, що дозволяє отримати і максимально реалізувати їх енергетичний потенціал;

- встановити залежність енергетичних параметрів функціонування електромеханічних систем вітроенергетичних установок від індивідуальних конструктивних показників складових автономного генеруючого комплексу, що дає можливість змінювати режими роботи вищезазначених комплексів у

залежності від необхідного рівня енергоспоживання та вітрової ситуації в місці їх дислокації.

Предметом дослідження дисертаційної роботи є електроенергетичні процеси в системах електропостачання з джерелами розподіленої генерації гірничо-збагачувальних комбінатів.

Об'єктом дослідження є електротехнічний комплекс вітроенергетичної станції в структурі систем електропостачання гірничо-збагачувальних комбінатів.

Методи дослідження. Теоретичні положення дисертаційної роботи засновані на складових теорії основ електротехніки. Для аналізу електроенергетичних процесів у системі електропостачання від вітроенергетичної станції використано елементи математичного аналізу. Аналіз електроенергетичних процесів електромагнітних процесів проведено із залученням методів математичного та фізичного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

- отримала подальшого розвитку методика визначення енергетичних характеристик вітроенергетичних установок в залежності від локації вітроенергетичних установок у структурі систем електропостачання гірничо-збагачувальних комбінатів та конфігурації розташування на мапі гірничих виробок;

- встановлено залежності електроенергетичних параметрів вітроенергетичних установок як в одиночному, так і комплексному варіантах для умов їх функціонування у складі систем електропостачання гірничо-збагачувальних комбінатів, що дозволяє отримати і максимально реалізувати їх енергетичний потенціал;

- встановлено залежність енергетичних параметрів функціонування електромеханічних систем вітроенергетичних установок від індивідуальних

конструктивних показників складових автономного генеруючого комплексу, що дає можливість змінювати режими роботи вищезазначених комплексів у залежності від необхідного рівня енергоспоживання та вітрової ситуації в місці їх дислокації.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає:

– в обґрунтуванні та оцінюванні доцільності застосування отриманих результатів для впровадження вітроенергетичних установок у комплексі автономних локальних систем генерації електричної енергії в умовах розподільчих мереж залізничних підприємств з метою підвищення енергоефективності електропостачання споживачів гірничо-збагачувальних комбінатів шляхом зменшення втрат електроенергії та надійності функціонування розподільчих електромереж підприємств – сегментах систем живлення віддалених споживачів електричної енергії для зниження собівартості видобутку корисних копалин;

– розробці варіанту архітектури функціонування вітроенергетичної станції з комплексом вітроенергетичних установок, що забезпечує потрібну стійкість до накидів напруги при імпульсному збільшенні рівнів навантаження на лопаті вітрогенераторів і виникнення коротких замикань у даному комплексі;

– розробці авторського варіанта енергоефективного електромеханічного комплексу вітроенергетичної станції для використання у структурах електричних мереж із розосередженою генерацією електричної енергії гірничо-збагачувальних комбінатів.

Одержані наукові результати, а саме: методику функціонування структур електротехнічних комплексів вітроенергетичних станцій в умовах гірничо-збагачувальних підприємств впроваджено в ТОВ «НВК Криворіжелектромонтаж», що підтверджено актом про впровадження від 22.04.2022 р., ТОВ «Рудомайн» (м. Кривий Ріг) – акт впровадження від 10.05.2022 р. (див. Додаток Є). Результати роботи також використовуються у

Криворізькому національному університеті на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті для підготовки фахівців за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, довідка про впровадження від 05.05.2022 р. (див. Додаток Є).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві, такий: [1] – запропоновано тактику оцінювання існуючих та очікуваних рівнів споживання електричної енергії приймачами залізрудних підприємств; побудовано графіки прогнозу генерації електричної енергії вітроенергетичною станцією; [2] – аналіз рівнів споживання електроенергії енергоємними споживачами шахт; визначено найбільш впливові фактори та їх вплив на величину результативної ознаки, яка кількісно відображає рівні споживання електроенергії; [3] – розробка тактики визначення вітрового потенціалу в умовах залізрудних підприємств; [4] – оцінка факторів, що впливають на енергоорієнтовні режими споживання електричної енергії енергоємними споживачами залізрудних шахт; [5] – аналіз функціональних режимів системи керування одиночної вітроенергетичної установки; [6] – схема досліджень ефективності використання повітряних потоків підземних виробок залізрудних шахт; [7] – аналіз середніх значень швидкості вітрового потоку по метеостанції м. Кривого Рогу; [8] – запропоновано варіант комбінованих структур електропостачання залізрудних підприємств з використанням відновлювальних джерел електроенергії; [9] – методологія оцінювання електроенергетичних електромеханічних комплексів вітроенергетичних установок з асинхронним генератором з ємнісним збудженням.

Результати теоретичних досліджень були отримані у Криворізькому національному університеті (КНУ) на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких науково-технічних конференціях і семінарах:

- на VI Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності підприємств ГМК», (м. Кривий Ріг, 2019);
- на Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Новітні технології у науковій діяльності та навчальному процесі» (НУ «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, 2021);
- на Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (КНУ, м. Кривий Ріг, 2021);
- на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні питання гірничо-металургійного виробництва» (КНУ, м. Кривий Ріг, 2021).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 10 робіт, з яких 2 статті у наукових фахових виданнях, 1 стаття у періодичному виданні України, яке внесене до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus, 2 статті у наукових журналах і збірниках наукових праць, 4 – у матеріалах конференцій, за результатами дисертаційної роботи отримано 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 244 сторінки, з яких основний зміст викладений на 177 сторінках друкованого тексту, містить 89 рисунків, 3 таблиці. Список використаних джерел складається з 130 найменувань. Додатки містять додаткові матеріали, що доповнюють і поглиблюють основну частину дисертаційної роботи, акти впровадження результатів роботи, список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА ОЦІНЮВАННЯ ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ В СТРУКТУРАХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

1.1 Загальні питання до доцільності застосування автономних джерел генерації електричної енергії в структурах систем електропостачання гірничих підприємств з відкритими способами видобутку залізорудної сировини

Встановлені потужності електроприймачів ЕЕ вітчизняних гірничо-збагачувальних комбінатів в середньому сягають 600 кВА [6, 11]. Між тим, рівні споживання ЕЕ структурними підрозділами цих підприємств різняться (рис. 1.1).

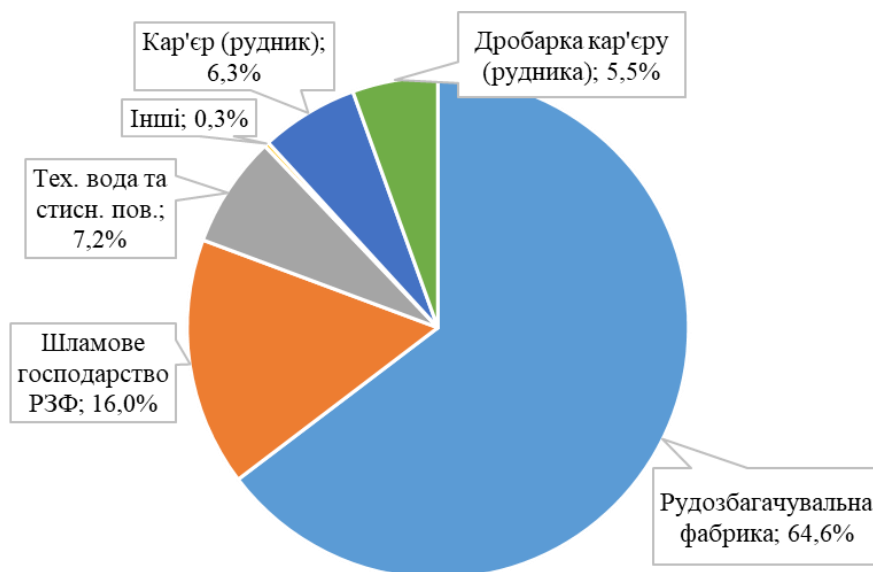


Рисунок 1.1 – Упосереднений за 2016-2021 роки розподіл рівнів споживання електричної енергії між споживачами вітчизняних гірничо-збагачувальних комбінатів

Окрім цього, ці підприємства займають значні земельні площі та відповідну розгалуженість ЛЕП. При цьому, більша частина земельних відведень, згідно технології функціонування даних підприємств це

технологічні ділянки виробництва, де роботи роботи проводяться на відкритому просторі – кар’єри, відвали пустих порід, шламосховища і т. п. Саме ці ділянки займають до 75-80 % від всіх промисловозадіяних у виробництві площ.

Логічно, що в такій ситуації потенційно задіяти ті чи інші види автономних джерел генерації ЕЕ, перш за все, для власних потреб цих технологічних ланцюгів процесу видобутку та збагачення рудної сировини [11, 13].

Тривіально, але до числа таких відновлювальних джерел ЕЕ, перш за все, можна віднести сонячну, гідро та вітрову енергетику. Разом з тим, використання першого з зазначених джерел в умовах ГЗК проблематично в зв’язку з значним, притаманним для цих виробництв, забрудненням повітря образивними металозмістовними речовинами, які осідають на всі прилеглі поверхні забруднюючи їх стійким шаром металопили.

Це є вагомим аргументом до проблематичної недоцільності застосовувати генеруючі потужності розбудовані на сонячних батареях без привентивної розробки ефективних антизабруднюючих засобів.

Друге з вищезгаданих спрямувань аналізується рядом наукових пошукачів в т. ч. Криворізького національного університету [15, 16] і не лежить в площині досліджень автора.

При цьому зазначимо, що ці ВДЕ не виключаються з переліку можливих для автономізації виробництва ЕЕ в умовах ГЗК. Але ці спрямування являють собою окремий об’єкт інших досліджень.

Важливою, та вельми негативною для екології, рисою в локації розташування відвалів та шламосховищ на території базового центру України з видобутку ЗРС – Криворізького залізорудного басейну є те, що ці техногенні суб’єкти розташовуються в більшості своїй у самому місті і їх дислокація пролягає безпосередньо серед житлових масивів на відстані не рідко близько 500-800 м.

Така ситуація не тільки підвищує негатив в екології відповідної території, а й є потенційно небезпечним джерелом техногенної небезпеки.

Водночас, як це не виглядає парадоксально, саме ці технологічні суб'єкти можуть і повинні бути використанні для позитивних моментів. Одним з таких суттєвих позитивів є розташування на цих суб'єктах об'єктів генерації ЕЕ, що функціонують на природовідновлювальних джерелах.

До переліку таких джерел, з достатнім рівнем енергоефективності логічно входять вітроенергетичні генератори ЕЕ. Пріоритетом серед інших видів генерації ЕЕ в аналізованому варіанті слід віддати вітроенергетиці. Основою такого ствердження є наступне:

- шламосховища та відвали являють собою значні за площею частини земельної території, яка офіційно виведена з землекористування;
- рівні поверхні вищезгаданих суб'єктів становлять 50-150 м над земною поверхнею;
- рівень негативного впливу на екологію практично нульовий;
- ВЕУ стійкі в функціонуванні в умовах гірничих підприємств, які відносяться до виробництв з підвищеним рівнем безпеки.

Ефективним варіантом для створення автономних джерел живлення систем електропостачання ГЗК вбачається використання ВЕС. Важливим моментом при цьому виступає факт екології та можливість варіативності встановлених електричних потужностей ВЕС в залежності від рівня технологічного попиту, який як свідчать дослідження зростає [11, 13–14].

Так, як свідчать дані (табл. 1.1 та рис. 1.2), рівень споживання ЕЕ приймачами шламосховищ вітчизняних ГЗК у 2021 р. в порівнянні з 2019 р., тобто за 2 роки, збільшився більше ніж на 25 %. Така тенденція прогнозно буде існувати і в подальшому [11, 14].

Таблиця 1.1 – Показники рівнів споживання електричної енергії складовими технології роботи гірничо-збагачувального комбінату (НК ГЗК, м. Кривий Ріг)

	Квартал	РУ	ДФ	РОФ	ШХ	ТВ
20.01.2019	1	4,1	6,1	61,8	15,5	7,7
20.04.2019	2	3,5	5,7	63,2	16,9	7
20.07.2019	3	3,5	6	65,8	14	7,9
20.10.2019	4	3,3	6,1	64,5	15,6	7,6
20.01.2020	5	2,5	6,2	61,7	16,4	7,3
20.04.2020	6	2,5	6,2	61,7	16,4	7,3
20.07.2020	7	2,9	5,6	64,4	13,8	7,8
20.10.2020	8	3,1	5,7	62,4	17,5	7,5
20.01.2021	9	3,2	5,1	66,9	12,9	7,5
20.04.2021	10	3,4	5,9	66,4	13,1	7,4
20.07.2021	11	2,9	5,1	60,2	20,3	7,2
20.10.2021	12	3,5	5	59,6	20,8	6,6

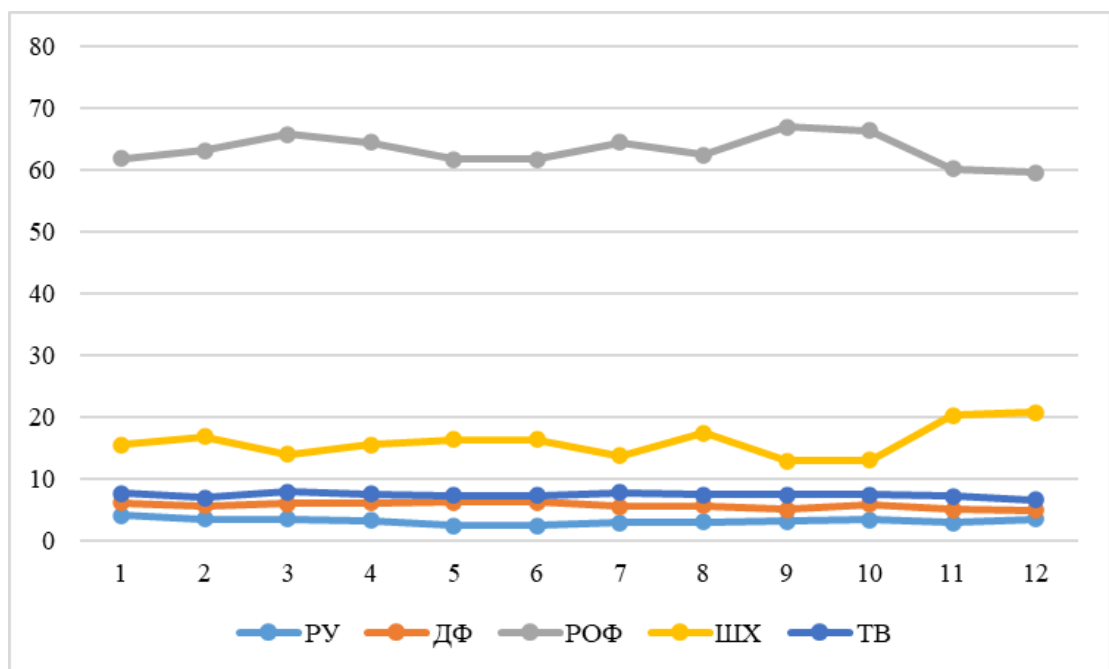


Рисунок 1.2 – Показники рівнів споживання електричної енергії складовими технологіями роботи гірничо-збагачувального комбінату (м. Кривий Ріг)

1.2 Загальний аналіз вітрового потенціалу в умовах гірничо-збагачувальних комбінатів України

Базовими енергетичними характеристиками вітрового потоку є валовий, технічний та економічний потенціали [17–21].

Валовий (теоретичний) потенціал енергії вітрового потоку відповідного регіону (країни, континенту) – це частина середньо-багаторічної сумарної енергії вітрового потоку, що доступна для використання на площі даного регіону протягом року.

Регіон, що аналізується, є сукупністю зон, у кожній з яких питома потужність вітрової енергії, географічні, кліматичні і погодні умови є однорідними по всій площі зони. Як правило, зони мають відповідати розташуванню метеорологічних станцій [19–21].

Технічний потенціал вітрової енергії являє собою сумарну електричну енергію, яка може бути отримана в регіоні від використання валового потенціалу вітрової енергії при певному технічному рівні розвитку та дотриманні екологічних норм [17].

Таким чином, технічний потенціал залежить від параметрів ВЕУ, середньорічної швидкості вітрового потоку в зоні та частини площі зони, яка придатна для спорудження ВЕУ.

Економічний потенціал енергії вітрового потоку регіону – це величина річного вироблення ЕЕ в регіоні від використання ВЕУ, отримання якої економічно виправдане для певного регіону при існуючому рівні цін на обладнання, виробництво, транспортування і розподіл енергії та палива і дотриманні екологічних норм [19–21].

У роботах [19–22] на основі аналізу даних щодо відведення площ для розміщення ВЕУ і технічних характеристик ВЕУ доведено, що технічний потенціал регіону становить 2% від його валового потенціалу, а економічний потенціал складає 0,5% від технічного потенціалу даного регіону.

Для оцінки вітрового потенціалу території, зокрема, валового, може бути використана наступна методика. Валовий потенціал розраховується як сумарна енергія системи БЕУ висотою h , розподілених рівномірно по території на відстанях, що виключають взаємний вплив установок. Зазвичай, вважається, що обурений вітровий потік повністю відновлюється на відстані, рівній $20h$ від ВЕС. Ця умова визначає порядок розміщення БЕУ по території. Тоді на території площею S (м^2) протягом часу T (зазвичай, рік), повна вітрова енергія всіх БЕУ визначається як [23]:

$$W_B = P \cdot T \cdot \frac{S}{20} = \frac{1}{40} \rho \cdot T \cdot S \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 \cdot t_i \quad (1.1),$$

або

$$W_B = \frac{1}{40} \rho \cdot T \cdot S \cdot \int_0^{\infty} V^3 \cdot f(V) dV, \quad (1.2),$$

де V_i , t_i – градації швидкості вітру і їх відносна тривалість.

Технічний вітровий потенціал території може бути визначений з урахуванням двох обставин [23].

Перша – площа території, яка придатна за господарськими і технологічними умовами для розміщення ВЕС. Тоді площа території S_t , придатної для використання вітрової енергії, рівна $S_t = qS$, де q – коефіцієнт, який залежить від конкретного регіону.

Фактично S_t – це частина території S , яка залишається після віднімання площі сільських господарств, промислових і водногосподарських територій, різних споруд і т. п.

При визначенні технічного потенціалу території в теперішній час рекомендується дотримуватись певних правил [24]:

1. Для ВЕС великої потужності (більше 100 кВт) коефіцієнт використання встановленої потужності повинен бути не нижче 20%.

2. Ефективність використання вітрової енергії збільшується зі зростанням потужності ВЕУ.

3. Зазвичай, для розміщення ВЕС може використовуватися не більше 30% території.

Друга – технічний рівень сучасних ВЕУ, який характеризує генеруючу потужність в залежності від швидкості вітру. Для мережевих ВЕС часто використовують віротурбіни з горизонтальною віссю обертання на висоті башти 50 м. Крім технічних характеристик власне ВЕУ, необхідно враховувати порядок їх розміщення за умови максимального використання енергії вітру.

Потужність ВЕС $P(V)$ з діаметром віротурбіни D визначається за виразом:

$$P(V) = \frac{\pi}{8} D^2 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot \eta(V), \quad (1.3)$$

де $\eta(V)$ – коефіцієнт корисної дії установки для швидкості вітру V .

Середньостатистичне значення потужності визначається як:

$$P_{cp} = \frac{\pi}{8} D^2 \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 \cdot \eta(V) \cdot t_i \quad (1.4)$$

На рис. 1.4 зображена карта вітроенергетичного потенціалу України. Як видно з рисунка, енергія вітру здатна ефективно використовуватись в окремих зонах при середньорічній швидкості вітру понад 5 м/с [17, 25].

Як ми бачимо, наш регіон знаходиться в зоні із середньорічною швидкістю вітру близько 4-4,5 м/с. Цієї швидкості достатньо для роботи ВЕУ, але одночасно замало для ефективного використання. Це свідчить про можливість упровадження в даних регіонах ВЕУ, але для більш ефективної роботи вітроустановок необхідна більша швидкість вітру [17–18, 26].

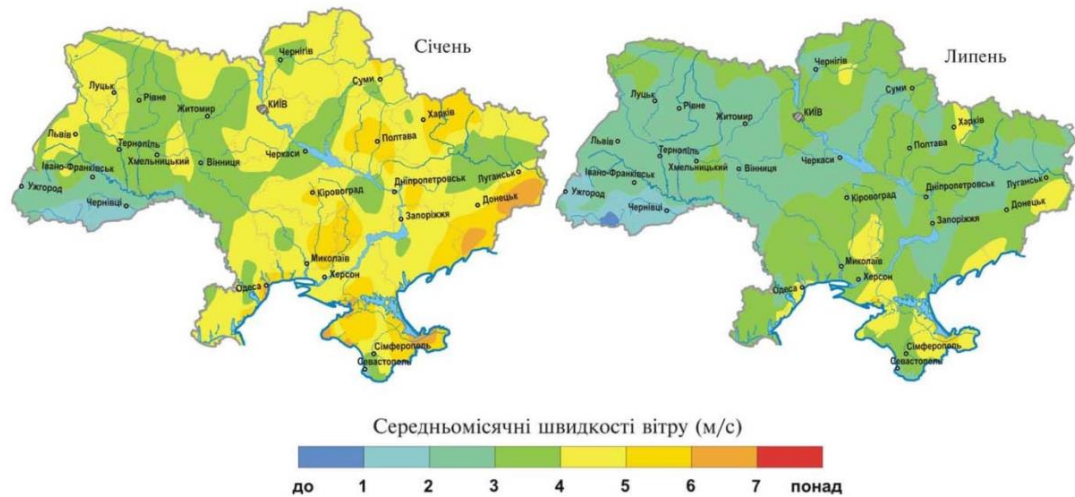


Рисунок 1.3 – Карта розподілу вітроенергетичних ресурсів України (січень, липень) [25]



Рисунок 1.4 – Карта розподілу середньорічних вітроенергетичних ресурсів України [25]

Україна має досить високий кліматичний потенціал вітрової енергії, який може забезпечити продуктивною роботою не лише автономні БЕУ, але й потужні ВЕС. Актуальною є необхідність у виявленні найперспективніших місць використання вітрової енергії і встановлення БЕУ, базуючись на її кліматичному потенціалі та показниках його можливої утилізації [14, 17–18].

1.3 Топологія гірничовидобувних підприємств з поглядом на можливість застосування в їх електроенергетиці автономних джерел енергії

Як зазначалось раніше, підприємства гірничорудної галузі є найбільшими з усієї когорти промислових виробництв носіями потенціалу власних енергетичних ресурсів, які можуть і повинні бути використані для виробництва власної електричної енергії.

На території України знаходяться декілька ГЗК [6, 27–28]. В їх числі в Криворізькому залізорудному басейні – 6 ГЗК: Інгулецький ГЗК, Південний ГЗК, Центральний ГЗК, Північний ГЗК, «АрселорМіттал Кривий Ріг» (НК ГЗК); у Кременчуцькому регіоні – Полтавський ГЗК. Окрім зазначених вище, функціонують ГЗК в Білозерському та Приазовському залізорудних районах.

Найбільший залізорудний район і головний гірничовидобувний центр України – Криворізький залізорудний басейн, який дає понад 90% видобутку залізної руди – розташований на території Дніпропетровської та частково Кіровоградської областей і являє собою смугу залізистих порід шириною 2-7 км, що простягаються з півдня на північ більш ніж на 100 км уздовж рік Інгулець, Саксагань і Жовта [29–30].

Широке розповсюдження порід джеспілітової формації обумовлює наявність у ньому промислових родовищ ЗР, які представлені багатими рудами та рудами, що потребують збагачення (залізисті кварцити). Рудні поклади потужністю від 10 до 100 м групуються в 25 родовищ. Їх розробляють відкритим (80% від загального видобутку руди) та підземним способами. Кар'єрами, головним чином, видобувають залізисті кварцити, що вимагає подальшого їх збагачення на збагачувальних фабриках.

Глибина розповсюдження багатих ЗР у Кривбасі становить понад 3,5 км, глибини видобутку в кар'єрах сягають до 500 м, а в шахтах досягають 1500 м. ЗР Кривбасу використовують для потреб чорної металургії України й експортуються в країни далекого та ближнього зарубіжжя.

Перспективи басейну пов'язані з подальшим поширенням виробництва ЗР за рахунок збагачення окисдовмісних залізистих кварцитів і значного збільшення видобутку магнетитних кварцитів.

Найбільш поширеним способом видобутку рудної сировини, який дозволяє застосовувати потужне і високопродуктивне обладнання, є відкрита розробка родовищ. Цим способом видобувається близько 85% обсягу ЗР.

Процес видобутку рудної сировини пов'язаний зі значними порушеннями природного середовища, які формуються на всіх етапах експлуатації родовища. Так, інтенсивність порушення земель кар'єрами вище, ніж шахтами в 10-12 разів [31].

При проведенні відкритих гірничих виробок з господарського обороту вилучаються великі площі земельних ресурсів, знижується якість ґрунтів, відбувається зміна гідрологічного режиму території. Для доступу до родовища з поверхні виймаються, переміщуються і складаються у відвали значні обсяги розкритих порід. У результаті витягу гірничих порід утворюється вироблений простір [32–33].

Розташування рудних покладів на значних глибинах при їх видобутку призводить до створення значних обсягів відвалів розкритих порід на земній поверхні. Відвали мають значні площі, а їх висота сягає 150 м.

Гірничорудна промисловість визначає суттєвий техногенний вплив на навколишнє природне середовище не тільки в межах родовища, але й в регіоні в цілому. Так, у Кривбасі відбувалася зміна природного ландшафту, який представлений кар'єрами та зонами відчуження з провалами від ведення підземних робіт, дамбами, відвалами і териконами; хвостосховищами і шламовідстійниками.

В [32–33] зазначено, що за результатами господарської діяльності гірничорудних підприємств річні обсяги складування розкритих порід становлять 70 млн. м³, у тому числі відходів збагачення і пустих порід – майже 52 млн. т, порушено більше 33 тис. га земель, з яких тільки 100 га на рік рекультивується. У відвалах заскладовано більше 2,2 млрд. м³ пустих порід, у хвостосховищах накопичено 2,6 млрд. т відходів збагачування, а щорічне відчуження земель для складування некондиційних залізних руд становить

400-500 га [32–33].

Проте, саме шламосховища та відвали пустих порід є практично підготовленими базами для розташування на них ВЕУ. Це твердження базується на факті значних ландшафтно укомплектованих площадок для ВЕУ, а також на тому, що головні земельні площі, на яких розташовуються відвали та шламосховища законодавчо виведені з землеобороту і по факту «гуляють». Фактично ці площі землі знівечені розташуванням на них вищезгаданих сегментів технології ведення гірничих робіт і чекають на своє використання, в т. ч. для розташування на них комплексів ВЕУ. При цьому, останні, як відзначалось у попередньому розділі, не заважають існуючому стану екології цих місць.

В той же час, прогрес у застосуванні ВЕС в Україні, в значній мірі, стримується фактом обмеженого потенціалу для їх спорудження відповідних земельних ресурсів і впливу на екологію прилеглих територій. Це не є позитивом у перспективі необхідності спорудження ВЕУ. Між тим, в реаліях технологій гірничовидобувних підприємств має місце наявність таких місць.

Проте, саме відвали гірничовидобувних підприємств і шламосховища можуть і повинні стати майданчиком для таких «острівців» власної електроенергетики даних підприємств.

Перші, згідно проєктів, плануються з висотою складування пустих порід 150 м над землею поверхнею та площами в тисячі кв. км для одного гірничозбагачувального підприємства.

Окрім того, відвали та шламосховища знаходяться далеко від центрів електричних навантажень, тому постає і друга складова в позитиві такого рішення – підвищення енергоефективності та надійності і безперебійності енергоспоживання віддалених споживачів.

Як видно з рис. 1.4, Криворізький залізорудний басейн знаходиться в зоні, де середньорічна швидкість вітру складає близько 4,5 м/с. Тому можна стверджувати, що ця зона придатна для впровадження ВЕС, але для дієвого

обґрунтування з отриманням максимально достовірних рішень для практичної реалізації цього проекту треба розглянути ряд варіантів [13–14].

У переліку комплексу пошуку даного спрямування першочерговим вбачається аналіз та оцінювання вітрового потенціалу і швидкості вітру в прогнозованих місцях дислокації ВЕУ [14].

З урахуванням того, що встановлення ВЕС планується на відвалах залізорудних підприємств згідно їх висоти над рівнем земної поверхні, то очікувана середньорічна швидкість вітру має бути перерахована згідно реальних висот відвалів і шламосховищ. А, як відомо, зі збільшенням висоти над землею поверхнею швидкість вітру збільшується. Тому необхідний поглиблений аналіз швидкостей вітру на відвалах залізорудних підприємств.

1.4 Превентивний аналіз режимів роботи вітроенергетичних установок у варіанті функціонування в структурі електромереж з розподільчою генерацією електричної енергії в умовах гірничорудних підприємств

Як відомо [19–21, 34], у загальному випадку ВЕУ являє собою комплекс взаємопов'язаного обладнання, призначений для перетворення енергії вітру в електричну і включає в себе вітроагрегат і вітрогенератор. Вітрогенератор безпосередньо перетворює енергію вітрового потоку в механічну, яка в подальшому трансформується в ЕЕ. Генератори ВЕУ поділяють на два основних типи:

- горизонтально-осьові, що характеризуються колінеарністю вектора кутової швидкості обертання вітродвигуна й аксіальної складової вектора швидкості вітрового потоку;
- вертикально-осьові, що характеризуються ортогональністю векторів кутової швидкості обертання вітродвигуна і аксіальної складової вектора швидкості вітрового потоку.

ВЕУ класифікують за такими ознаками [19–21, 34–36]:

- видом вироблюваної енергії;

- рівнем потужності;
- призначенням;
- областями застосування;
- ознакою роботи з постійною або змінною частотою обертання вітроколеса;
- способами управління;
- типом системи передачі вітрової потужності споживачу.

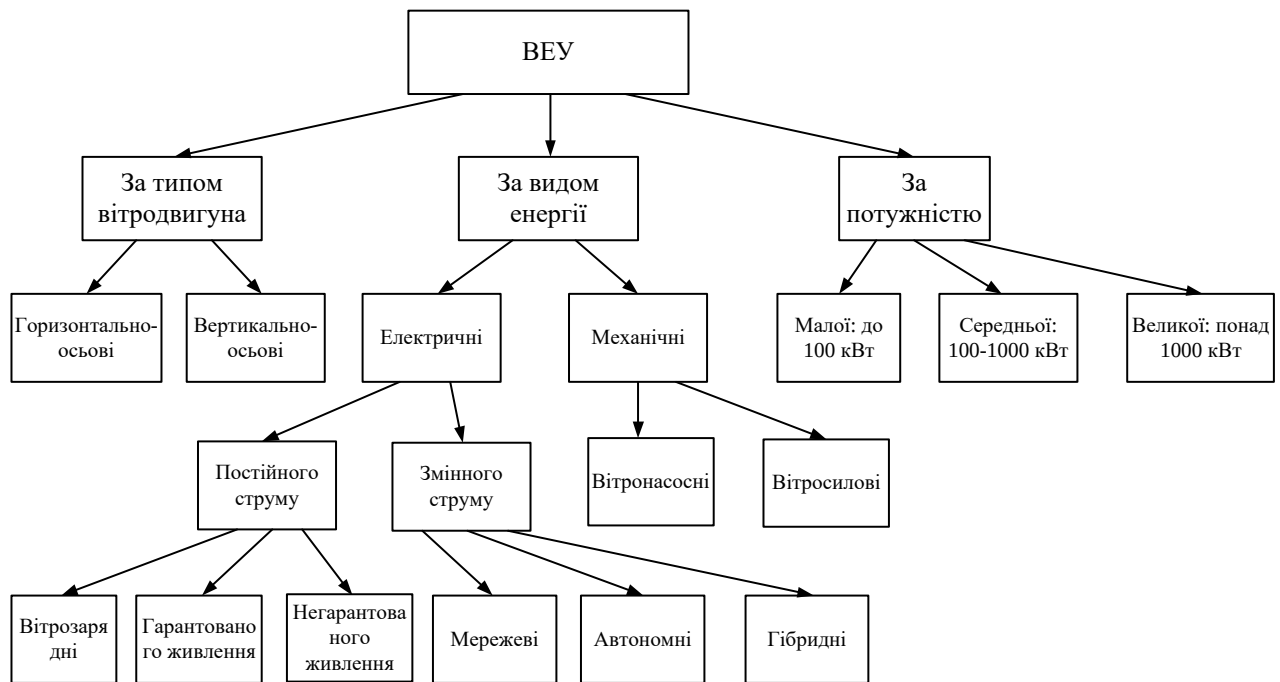


Рисунок 1.5 – Класифікація вітроенергетичних установок [19, 37]

Залежно від виду енергії, що виробляється ВЕУ, поділяють на вітроелектричні та вітромеханічні. Електричні ВЕУ поділяються на ВЕУ, що виробляють ЕЕ постійного або змінного струму. Механічні ВЕУ служать для приводу робочих машин [19–21, 34–36].

За рівнем потужності ВЕУ розділяють на групи:

- дуже малої потужності, менше 5 кВт;
- малої потужності, від 5 до 100 кВт;
- середньої потужності, від 100 до 1000 кВт;
- великої потужності, понад 1 МВт.

ВЕУ кожної групи відрізняються одна від одної конструктивним виконанням, типом фундаменту, способом установки вітроагрегата на вітер, системою регулювання, системою передачі вітрової потужності, способом монтажу і способом обслуговування [19–21, 34–36].

У залежності від призначення електричні ВЕУ постійного струму поділяють на [19–21, 34–36]:

- вітрозарядні;
- гарантованого електропостачання споживача;
- негарантованого електропостачання.

Електричні ВЕУ змінного струму поділяють на [19–21, 34–36]:

- автономні;
- гібридні, що працюють паралельно з енергосистемою сумірної потужності;
- мережеві, які працюють паралельно з потужною енергосистемою.

Механічні ВЕУ за призначенням поділяють на [19–21, 34–36]:

- вітронасосні для приводу водяних насосів;
- вітросилові для роботи з промисловими і побутовими механізмами.

Класифікація ВЕУ за областями застосування визначається їх призначенням. При розрахунку, проектуванні та виборі номінальних параметрів вітродвигуна враховується [19–21, 34–36]:

- тип навантаження;
- тип системи передачі вітрової потужності до споживача;
- тип системи генерування та акумулювання ЕЕ.

Одна або декілька груп ВЕУ утворюють ВЕС, до складу якої входять (крім ВЕУ):

- система управління ВЕС;
- одна або кілька метеовишок;
- трансформаторні підстанції;
- підстанція.

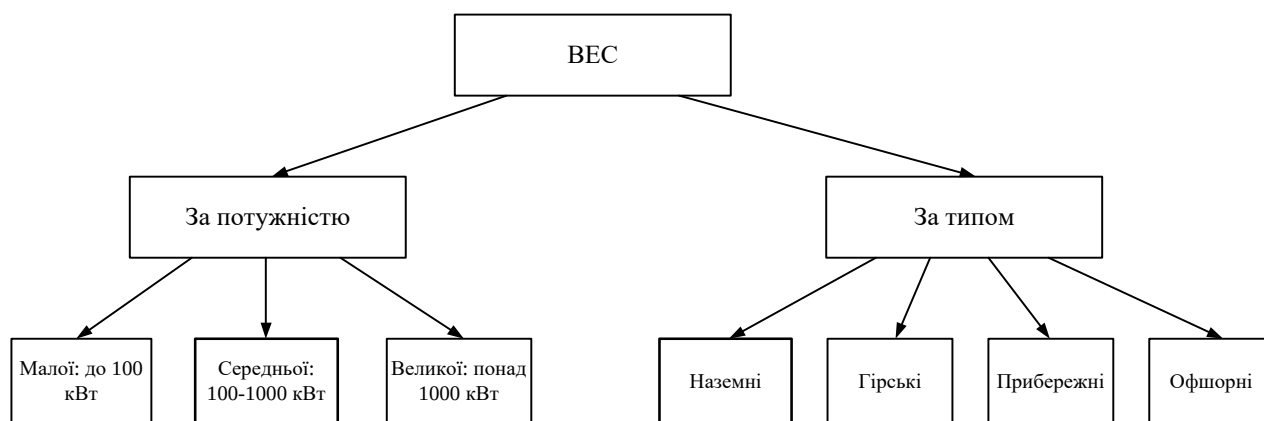


Рисунок 1.6 – Загальна класифікація вітроенергетичних станцій [19]

Згідно [19–21, 34–36], система керування ВЕС здійснює керування, контроль і облік роботи ВЕС в цілому і кожної ВЕУ, зокрема. Метеовишка призначена для визначення швидкості і напрямку вітру та видачі цієї інформації до системи керування ВЕС. Трансформаторна підстанція обслуговує декілька ВЕУ і забезпечує підвищення напруги від генераторів ВЕУ до величини ЛЕП на підстанцію. Підстанція ВЕС призначена для розподілу і передачі ЕЕ від ВЕС в електромережу енергосистеми [19].

Взагалі, генеруючі установки традиційних електричних станцій можна розділити на основні групи [19–21, 34–36, 38]:

- 1) для покриття основного навантаження, що характеризується безперервним виробленням електричної енергії;
- 2) для покриття проміжного навантаження, що характеризується циклічною роботою і змінюваної частини сумарного графіка навантаження;
- 3) для покриття пікових навантажень, створення енергетичного резерву.

У зв'язку з цим використання ВЕУ можливе в трьох режимах електропостачання: автономному, вибіркового і паралельному.

Автономний режим передбачає повне забезпечення безперервного електропостачання споживачів від ВЕУ впродовж встановленого терміну її експлуатації [19, 38].

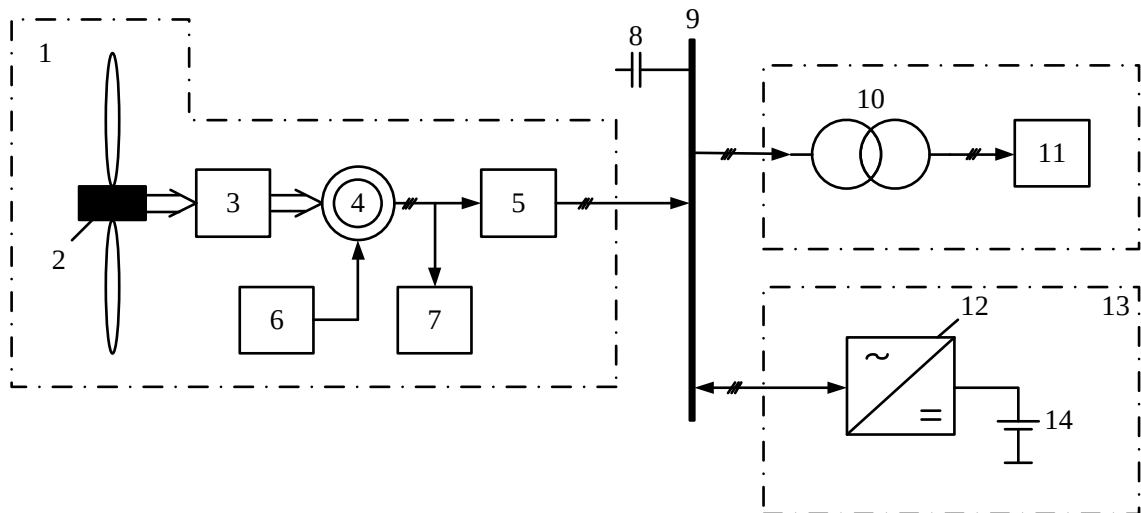


Рисунок 1.7 – Робота вітроенергетичної установки в автономному режимі

На рис. 1.7 зображено: 1 – ВЕУ; 2 – вітротурбіна; 3 – редуктор-мультиплікатор; 4 – СГ; 5 – пристрій синхронізації; 6 – регулятор струму збудження СГ; 7 – блок баластного навантаження; 8 – компенсатор реактивної потужності; 9 – шина змінного струму; 10 – силовий підвищуючий трансформатор; 11 – споживачі на ГПП напругою 6-10 кВ; 12 – двонаправлений перетворювач змінної напруги в постійну; 13 – буферний накопичувач електроенергії; 14 – блок акумуляторних батарей

Вибірковий режим характеризується тим, що навантаження повинне розподілятися між енергосистемою і ВЕУ. Важливо зазначити, що потужність, яка виробляється ВЕУ і перевищує потужність навантаження, подається безпосередньо в енергосистему, а її дефіцит для покриття графіка навантаження задовольняється за рахунок енергосистеми. Тому в періоди, коли швидкість вітрового потоку знаходиться за межами робочих швидкостей або дорівнює нулю, енергосистема має самостійно нести це навантаження [19, 37–38].

Як зазначено в [19, 38], паралельний режим роботи з енергосистемою являє собою роботу не на конкретного споживача, а має бути спрямований або на збільшення сумарного вироблення ЕЕ, або на часткове покриття сумарного

графіка навантаження енергосистеми, забезпечуючи при цьому істотну економію органічного палива.

Коливання потужності вітрового потоку призводитимуть до істотних коливань потужності, що виробляється ВЕУ, при цьому періоди, коли швидкості вітру знаходяться поза межами робочого інтервалу, можливо передбачити лише з певною вірогідністю. Навіть у тих районах, де постійно є наявність енергії вітрового потоку, електромагнітна потужність ВЕУ, що виробляється, буде оптимальним чином підібрана для цього вітрового кадастру, оскільки він сам по собі випробовує годинні, добові і сезонні зміни [19, 38].

Внаслідок цього спроби безпосередньо узгодити електромагнітну потужність, що виробляється ВЕУ, з профілем графіка навантаження, призведуть до втрат потужності, які можуть суттєво відобразитися як на роботі окремих споживачів, так і енергосистеми в цілому [19, 38].

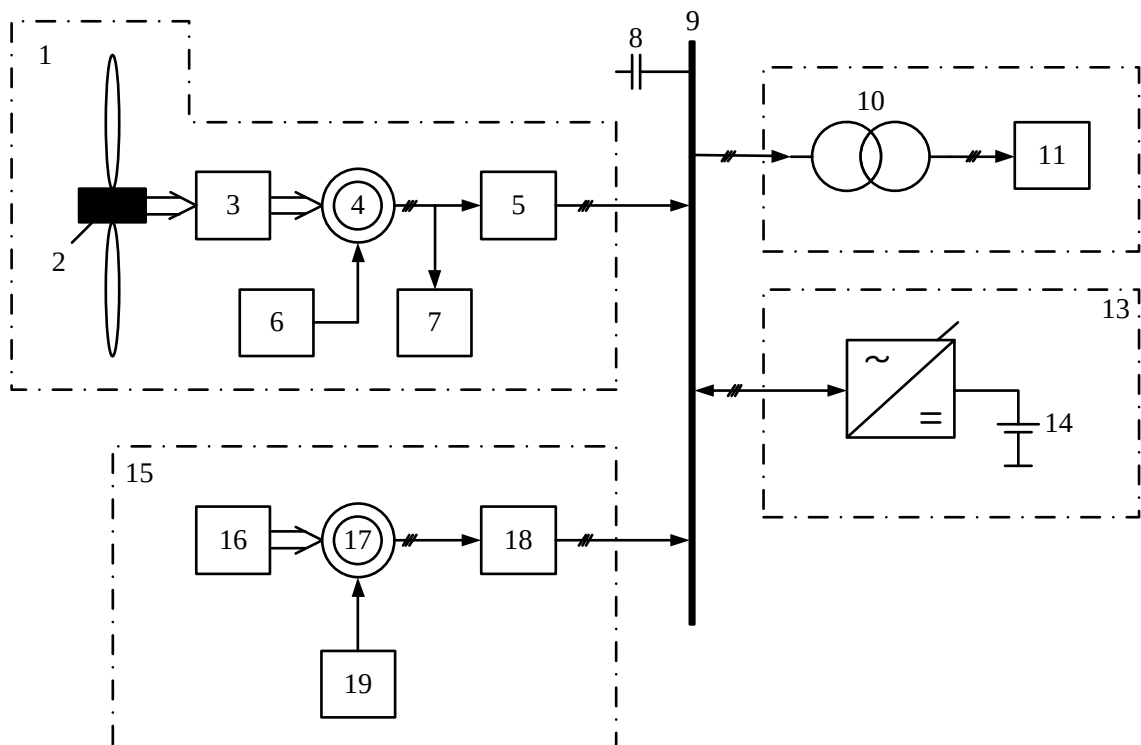


Рисунок 1.8 – Робота вітроенергетичної установки в локальному режимі: 15 – дизель-генератор; 16 – дизельний двигун; 17 – СГ; 18 – пристрій синхронізації; 19 – регулятор струму збудження СГ

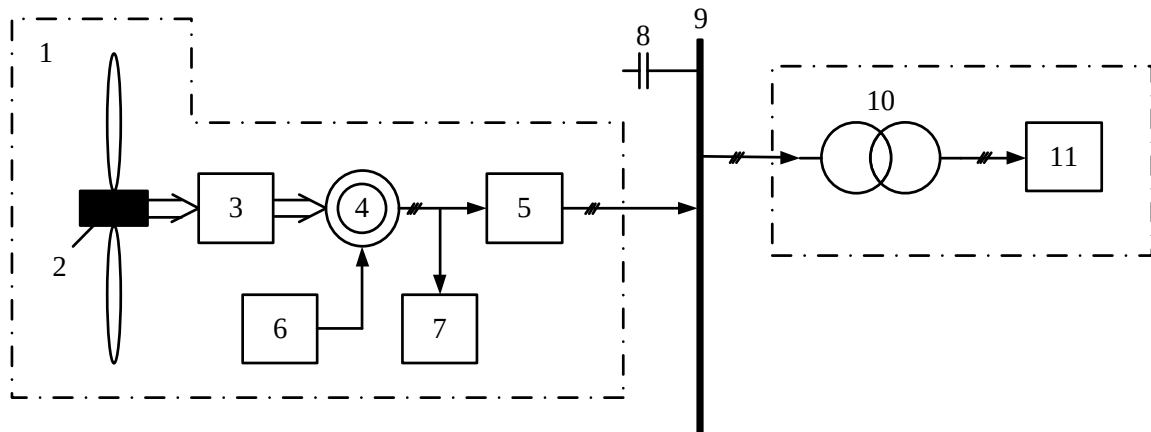


Рисунок 1.9 – Робота вітроенергетичної установки на мережу:

11 – розподільча електромережа підприємства

У загальному випадку вказані особливості роботи ВЕУ, графіків навантаження і енергосистеми роблять неможливим самостійне використання ВЕУ без відповідних систем резервування, оскільки таке використання не здатне забезпечити надійне і безперебійне електропостачання споживачів. В залежності від типу використовуваної системи резервування ВЕУ слід розділити на ВЕУ з резервуванням від енергосистеми і ВЕУ з акумуляцією ЕЕ [19, 38].

У першому випадку повна утилізація енергії вітрового потоку вимагає від енергетичної системи прийняття перетвореної ЕЕ ВЕУ у будь-який час і у будь-якій кількості. При цьому традиційні електричні станції, за винятком атомних, повинні згладжувати випадкові коливання електромагнітної потужності, що виробляється ВЕУ, і погоджувати потужності генерації з сумарним графіком навантаження енергосистеми, що призводить до необхідності наявності резервних енергетичних установок, що знаходяться в постійній готовності [19, 38].

У другому випадку, якщо потужність, що виробляється ВЕУ, перевищує споживання енергосистеми, її надлишок подається в накопичувачі. Якщо ж кількість ВЕУ досить велика, а система накопичення ЕЕ побудована з урахуванням вітрового режиму, то це дозволить усереднити сумарне

вироблення ЕЕ, і в енергосистемі безперервно надходитиме постійна потужність. В результаті цього ЕЕ буде вироблятися у будь-яку пору року [19].

Режим роботи вітрогенератора повністю визначає для ВЕУ спосіб перетворення енергії вітрового потоку в ЕЕ. Тому, залежно від структури побудови перетворювальної електричної частини, ВЕУ поділяються на ВЕУ з безпосереднім перетворенням і з проміжним частотним перетворенням. До першого типу відносяться синхронні й асинхронні ВЕУ, до другого – ВЕУ з каскадним включенням електричних машин (генератора, випрямляча, інвертора, перетворювача) [19, 39].

При роботі асинхронної ВЕУ паралельно з енергосистемою, статор АГ підключений до енергосистеми, а добуток частоти обертання валу вітрогенератора і передатного відношення мультиплікатора більше синхронної частоти.

Електромагнітна потужність, що генерується асинхронною ВЕУ, також визначається частотою обертання вітрогенератора, як і у випадку синхронної ВЕУ. Тому для такої ВЕУ має бути забезпечений режим фіксованої кутової частоти обертання ротора асинхронного генератора по відношенню до вибраної номінальної частоти обертання. При цьому асинхронна ВЕУ матиме значний запас динамічної стійкості за моментом [19, 39].

Проте, незважаючи на це, асинхронна ВЕУ повинна мати захист від підвищення частоти обертання, оскільки сильний порив вітрового потоку може значно збільшити обертовий аеродинамічний момент, у результаті чого асинхронна ВЕУ може перейти на нестійку ділянку механічної характеристики. При цьому генерована електромагнітна потужність почне швидко знижуватися, а частота обертання продовжуватиме збільшуватися, що може призвести до аварійної ситуації [19, 39–40].

Запуск асинхронної ВЕУ в роботу на певному етапі фактично є роботою АГ в режимі двигуна на холостому ході. Ця фаза роботи ВЕУ триватиме доти, доки не буде досягнута підсинхронна частота обертання ротора, починаючи з

якої підключається вітродвигун, що обертається, і переводить ВЕУ в генераторний режим [19, 41].

Для роботи асинхронної ВЕУ паралельно з енергосистемою та для коригування коефіцієнта потужності її генератор повинен самозбуджуватися від блока статичних конденсаторів. Наявність такого самозбудження дає можливість асинхронній ВЕУ стійко працювати на навантаження будь-якого характеру [19, 40, 42].

При роботі синхронної ВЕУ паралельно з енергосистемою допускаються лише слабкі за амплітудою коливання частоти обертання ротора СГ, що сягають 1-2% від номінальної, упродовж короткого проміжку часу. Тому необхідно, щоб синхронна ВЕУ мала достатню динамічну електричну стійкість у періоди, коли вона піддається дії поривів вітрового потоку, що несподівано змінюються, адже вимушені коливання, викликані нерівномірністю обертання вітродвигуна, накладаються на вільні коливання, обумовлені властивостями самого СГ ВЕУ та енергосистеми, що може призвести до резонансу струму або напруги [19].

Так, раптова зміна швидкості вітрового потоку на 25% при фіксованій швидкості обертання вітродвигуна збільшує величину крутного аеродинамічного моменту вітродвигуна, майже вдвічі [19, 39].

Таким чином, синхронна ВЕУ в режимі фіксованої кутової частоти обертання при постійному збудженні зі збільшенням швидкості вітрового потоку буде супроводжуватись зростанням частоти обертання валу вітродвигуна, збільшенням кута потужності та збільшенням електромагнітної потужності, що розвивається. Тому за певних умов синхронна ВЕУ може випасти з синхронної роботи з енергосистемою [19, 42].

Для уникнення цього вектор ЕРС при роботі синхронної ВЕУ завжди повинен випереджати вектор напруги в мережі. При цьому збільшення кута електромагнітної потужності триватиме до тих пір, поки не настане рівновага крутного аеродинамічного моменту вітродвигуна, приведенного до валу СГ і

моменту навантаження, що є сумою електромагнітного моменту, що розвивається, і моменту втрат. В результаті цього синхронна ВЕУ продовжуватиме працювати вже з більшим навантаженням і, відповідно, з меншим запасом динамічної стійкості та питомої синхронізуючої потужності [19, 39].

Для того, щоб підвищити електромагнітну потужність, що розвивається, і тим самим забезпечити рівновагу на валу синхронного генератора ВЕУ, необхідно збільшити ЕРС. При цьому, збільшення ЕРС повинно досягатися швидким наростанням струму збудження. Тому треба використати незалежне збудження СГ, адже воно з даної точки зору прийнятніше за самозбудження [19].

Сумарний коефіцієнт використання енергії вітрового потоку асинхронної ВЕУ нижчий, ніж у синхронної ВЕУ; коефіцієнт потужності в результаті споживання реактивного струму від енергосистеми також знижується. Це пояснюється тим, що струм намагнічування асинхронної ВЕУ складає 20-25% від номінального струму, при цьому потужність збудження синхронної ВЕУ складає менше 1% від номінальної потужності СГ [19, 40].

З урахуванням спеціальних умов роботи, для режиму паралельної роботи з енергосистемою асинхронні ВЕУ прийнятніші за синхронні, оскільки вони відрізняються такими перевагами [19]:

- відсутністю необхідності точної синхронізації з енергосистемою, що допускає коливання аеродинамічного крутного моменту, які мають місце через поривчастий характер вітрового потоку;
- значним запасом стійкості електромагнітного моменту, що розвивається;
- наявністю незначного запасу за частотою обертання внаслідок частотного поділу між частотою обертання ротора АГ і частотою енергосистеми;

– нижчою вартістю, надійністю і простотою в експлуатації, управлінні та обслуговуванні.

1.5 Аналіз експлуатованих систем електропостачання гірничо-збагачувальних комбінатів. Стан. Проблеми. Перспектива

Під системою зовнішнього електропостачання розуміють комплекс технічних пристроїв, що забезпечує передачу ЕЕ від джерела живлення до приймальних підстанцій гірничого підприємства, які включають підстанції глибокого введення (ПГВ) і ЛЕП, а від них до ГПП. Ввід на ПГВ здійснюється напругою 35, 110, 150 та 220 кВ, а на ГПП (залежно від умов) – від 6 до 220 кВ [31, 43]. Проектують системи електропостачання гірничих підприємств у відповідності до класифікації електроспоживачів за надійністю електропостачання.

За характером шкоди, що може бути нанесена гірничому підприємству через перерви в електропостачанні, всі споживачі ЕЕ поділяються на 3 категорії (I, II, III). Електропостачання гірничих підприємств здійснюється не менше, ніж за двома лініями від двох незалежних джерел живлення (незалежно від величини напруги). Всі живильні ЛЕП повинні знаходитися під навантаженням [9–10, 44–45].

ГПП, які входять до системи електропостачання гірничих підприємств, являють собою, як правило, розподільчу трансформаторну підстанцію, в якій встановлюються 2 трансформатора.

Потужність кожного з них забезпечує 100% навантаження, або при аварійному відключенні одного з трансформаторів, що залишилися, забезпечує живлення споживачів I категорії та основних споживачів II категорії на час ліквідації аварії [43].

При необхідності мати на ГПП кілька вторинних напруг (наприклад, 35 і 10 кВ) на кар'єрах встановлюють трьохобмоткові трансформатори і виконують окремі РП.

Певну специфіку має електропостачання гірничих підприємств при відкритих виробках. Сучасні кар'єри – повністю електрифіковані гірничі підприємства із встановленою потужністю до десятків МВА. Характерна їх особливість – розташування кар'єрних електроустановок на значній площі. Екскаватори, бурові верстати безперервно або періодично переміщуються, експлуатуються на відкритому повітрі, в запиленому середовищі, піддаються значним механічним впливам при вибухах, пересуваннях і т.п. Електроприймачі живляться напругою 6-10 кВ та 0,4 кВ.

Основні елементи системи електропостачання кар'єра: одна або декілька ГПП, ЦРП, кар'єрні лінії електропередач, кар'єрні розподільні пункти КРП, пересувні УТП, перемикальні пункти ПП та проміжні пункти захисту. Схеми розподільчих мереж кар'єра поділяються на радіальні, магістральні та комбіновані. В залежності від розташування ліній електропередач щодо фасаду робіт їх поділяють на подовжні та поперечні.

Живлення декількох споживачів або РП в першому випадку здійснюється по бортовій лінії, що розташована за межами робочих горизонтів [44, 46]. Пересувні приймачі живляться від повітряних ЛЕП гнучкими кабелями через стаціонарні або пересувні ПП, які розташовані через 200-300 метрів.

При поперечній схемі електроприймачі та ТП кар'єра живляться ПП з поперечних ліній, з'єднаних зі стаціонарними ЛЕП, прокладеними вздовж бортів кар'єра за межами поля розроблюваної площі. Комбінована схема кар'єра являє собою відкриту бортокільцеву систему з повітряними та кабельними ЛЕП, що прокладаються в довготривалому та поперечному напрямках по відношенню до фронту робіт. Така схема може мати одно- або двостороннє живлення із включенням ЛЕП на паралельні роботи.

Концентрація електричних навантажень, висока енергоємність процесів та особливості технологічного циклу в найбільшій мірі характерні для залізрудних ГЗК, до складу яких, крім ЗФ з комплексом дроблення, входять

фабрики окомкування та агломерації. Сучасні ГЗК, які переробляють, наприклад, 40 млн. т сирової руди на рік, оснащені обладнанням із установленою потужністю близько 700 МВт. Живлення таких підприємств ЕЕ доцільно здійснювати напругою 110-220 кВ з пристроєм однієї-двох підстанцій глибокого вводу (ПГВ). Схемні рішення підстанцій і вибір захисно-комутаційної апаратури визначаються ТЕО [43–44, 46].

Система внутрішнього електропостачання збагачувальних фабрик являє собою сукупність цехових підстанцій, РП, РУ, кабельних і повітряних ліній у межах промислової площадки. Цехові підстанції і РП 6-10 кВ прибудовуються до технологічного корпусу або вбудовуються в нього. Живлення РП здійснюється по кабельній лінії. Для передачі ЕЕ в мережах внутрішнього електропостачання фабрики, наряду з кабелями, широке розповсюдження отримали шинопроводи (навантаження більше 1000 А при напрузі 6-10 кВ) [9–10].

Для розподілу ЕЕ всередині виробничих корпусів і між ними (якщо вони живляться від однієї підстанції), використовуються розподільні лінії по радіальних, магістральних і комбінованих (кільцевим) схемах. Широке розповсюдження отримали схеми з шинними магістралями. РП головних і цехових підстанцій виконуються двосекційними з пристроєм АВР.

Схеми електропостачання будуються, в основному, з використанням гнучких струмопроводів: дво- і трьохобмоткових трансформаторів, а також із розщепленою обмоткою нижчої напруги; масляних, електромагнітних і вакуумних вимикачів; комплектних розподільчих пристроїв і комплектних трансформаторних підстанцій [10].

Сучасні збагачувальні фабрики є високоомеханізовані підприємства з установленою потужністю різного роду машин і механізмів 100-150 МВА. Різноманітні агрегати об'єднуються в кілька паралельних технологічних ліній, працюють у суворій послідовності, а при необхідності ще розрізуються на

паралельні тракти. Подібна структура вимагає жорстких вимог до систем електропостачання.

Близько 30% від загальнопромислового обсягу споживання ЕЕ в Україні відноситься до підприємств гірничорудної промисловості [4, 11, 47–48]. Це значні обсяги, які дозволяють вищезгаданим підприємствам вносити значний вклад в економіку держави. Водночас, енергетичний тягар є відчутним для економіки даних видів підприємств і без прийняття відповідних заходів щодо зниження енергоємності видобутку корисних копалин, і перш за все ЗР, підприємства галузі, як і держава в цілому втратить своє пріоритетне місце в еліті держав – лідерів на світовому ринку ЗРС для металургійного виробництва.

Тобто, енергетична проблема гірничовидобувних підприємств формується як загальнодержавна і потребує прийняття ефективних заходів для її рішення.

Одним із реальних спрямувань у зниженні енергоємності видобутку ЗРС є застосування автономних джерел живлення в структурах систем електропостачання цих видів підприємств. Для цього, як свідчать результати проведених досліджень [11, 13-14, 47], в технології їх функціонування в достатній кількості є власні енергетичні ресурси [48].

Як доповнення до цієї тези додамо, що в останні роки, як у світі, так і в Україні, спостерігається стійке зацікавлення проблемами використання відновлювальних джерел енергії, серед яких значна увага приділяється ВЕУ. Частка таких систем в енергобалансі всіх технічно розвинених країн світу зростає [49–51].

Разом з тим, зазначимо, що включення як вітрових, так і інших видів генеруючих потужностей у структури систем електропостачання промислових підприємств створює новий тип електроенергетичних систем – системи з джерелами розосередженої генерації (ДРГ) ЕЕ [11, 13–14, 52].

Як свідчать дослідження, децентралізовані енергосистеми з використанням ДРГ є актуальними для впровадження, у тому числі, в структури електропостачання промислових підприємств і особливо їх енергоємних видів. Упровадження ДРГ дозволить зменшити втрати ЕЕ у внутрішніх електричних мережах, що сьогодні сягають майже 30%, зменшити рівень сплати за її споживання, оскільки ЕЕ вироблена із власних ресурсів буде дешевше мінімум в 4 рази від тієї, що постачається централізовано, та, що не менш важливо, забезпечити необхідний ступінь надійності і безперебійності електропостачання.

Енергетична складова в собівартості продукції гірничо-збагачувальних підприємств досягає 27-32%. В останні десятиріччя вагова складова енергетики суттєво зростала. У той же час, завантаженість силових трансформаторів у ГПП рідко перевищує 20% від їх номіналу, а втрати в внутрішньоцехових мережах сягають 25-30%, що є неприпустимим. У свою чергу, втрати ЕЕ в мережах до 1 кВ ще більші. Одними з найбільш втратних є мережі до 1 кВ, які живлять віддалених споживачів ЕЕ. Протяжність цих ЛЕП сягає 10-ки км [4, 52–53].

Автор вбачає важливим тут є застосування автономних джерел живлення. Тому все актуальнішим стає питання збільшення обсягів отримання енергії за рахунок використання поновлювальних джерел.

Одним із можливих варіантів модернізації системи електропостачання є впровадження ВЕС [11, 13–14, 47].

Тож актуальним науково-практичним завданням є впровадження ВЕС для автономного генерування ЕЕ в умовах ГЗК і розроблення методу та пристрою керування електромеханічним комплексом ВЕС, який би забезпечував роботу ВЕС у всьому діапазоні зміни швидкостей потоку повітря і прийнятну якість генерованої ЕЕ.

1.6 Особливості підключення вітроенергетичних станцій до електричних мереж гірничорудних підприємств

Згідно [19, 23, 54–56], структура, характеристики та комплектуючі схеми електричних з'єднань ВЕУ визначаються багатьма чинниками: одиничною потужністю установок, їх кількістю, розташуванням на місцевості, типом застосовуваних генераторів ЕЕ і наявністю статичних перетворювачів.

Фактично ВЕС є локальною розподільною електричною мережею зі спрямованим назад потоком енергії. Залежно від перерахованих вище параметрів сполучна мережа ВЕС може бути виконана за магістральним, радіальним або змішаним принципами. Взаємне розташування установок і дистанція між ними обумовлені в основному двома чинниками: одиничною потужністю і формою рози вітрів на відповідному майданчику [19, 54, 57].

На даний час у складі ВЕС найбільш широкого поширення набули ВЕУ з одиничними потужностями 1,5-3,5 МВт, номінальною напругою 660-690 В і діаметрами вітротурбіни 60-90 метрів.

Найпростіший розрахунок [38, 54–56] показує, що при зазначених потужностях генераторів і наведених вище довжинах сполучних кабельних ліній економічна робота мереж ВЕС можлива лише в разі застосування в них підвищених робочих напруг.

Найчастіше сучасна мережева ВЕУ забезпечується власним підвищуючим трансформатором, а з'єднання установок між собою здійснюється на стороні середньої напруги від 6 до 30 кВ [38, 54–56].

На рис. 1.10 наведені варіанти радіальних схем ВЕС на базі ВЕУ з різними типами електрогенераторів.

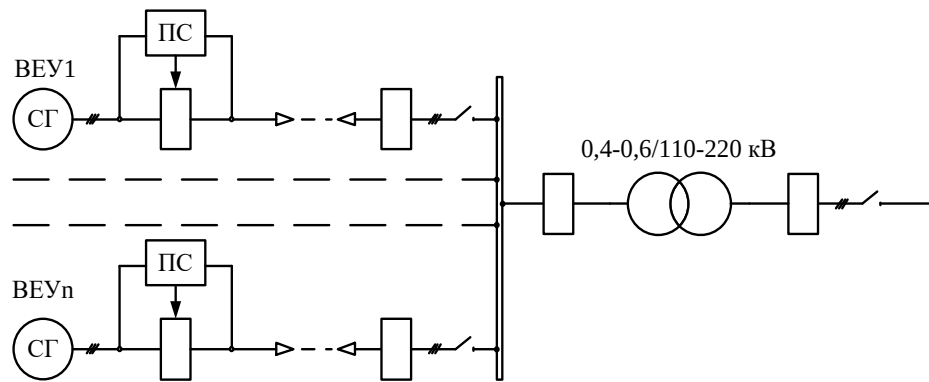


Рисунок 1.10 – Вітроенергетичні станції невеликої потужності на базі вітроенергетичних установок із синхронними генераторами

У разі, коли статичні перетворювачі відсутні і частота обертання валу установки при роботі підтримується стабільною і кратною частоті мережі, для ВЕС на базі ВЕУ з СГ існує декілька варіантів підключення [38, 54–56]:

- кожен генератор має власний пристрій синхронізації;
- пристрої автоматичної синхронізації синхронізують генератори між собою у групах, а потім відбувається синхронізація груп із мережею;
- пристрої автоматичної синхронізації синхронізують генератори між собою у групі, потім синхронізуються групи, а з мережею синхронізація відбувається безпосередньо на головній підвищувачій підстанції.

Очевидно, що перший варіант найбільше відповідає експлуатаційним вимогам і дозволяє встановлювати мінімальну кількість синхронізуючих пристроїв. У даному випадку будь-який із генераторів може підключатися до мережі незалежно від інших, при запуску після аварії на одній із підстанцій першого ступеня синхронізується тільки одна група генераторів [54–56].

У роботах [19, 38, 54–56] зазначено, що недоліками такої концепції є необхідність частої синхронізації генераторів ВЕУ при підключенні до мережі і недовиробіток ЕЕ, обумовлений постійною частотою обертання вітротурбіни. Синхронізація повинна здійснюватися щоразу після відключення ВЕУ від мережі внаслідок недостатньої величини швидкості

вітру, після відключення від мережі внаслідок перевищення максимальної швидкості вітру, а також після планових оглядів і ремонтів.

У свою чергу, застосування АГ дозволяє виключити з головної схеми ВЕС синхронізуючі пристрої. Однак, у даному випадку доводиться розплачуватися за споживану реактивну потужність з мережі або використовувати пристрої компенсації реактивної потужності [19, 38, 54–56].

Компенсуючі пристрої можна встановити безпосередньо біля кожного генератора, один на кожную групу генераторів або один на підвищувальну підстанцію другого ступеня (рис.1.11). Для «м'якого» підключення ВЕУ до мережі після досягнення вітротурбіною синхронної частоти обертання в таких схемах використовуються керовані тиристорні вентиля [58–59].

Аналогічні схеми підключення можуть бути використані для ВЕУ на базі двошвидкісних АГ і АГ із фазним ротором і регульованим ковзанням. Однак, такі електричні машини частіше застосовуються у складі більш потужних ВЕУ, що оснащені індивідуальними підвищувачами трансформаторами [19, 38, 54–56].

Якщо ВЕУ, що входять до складу ВЕС, мають непостійну частоту обертання вітротурбіни й оснащені АГ з короткозамкненим ротором або СГ непостійної частоти обертання, передача всієї електричної потужності в мережу здійснюється за допомогою статичного перетворювача частоти (рис. 1.12) [54–56, 60].

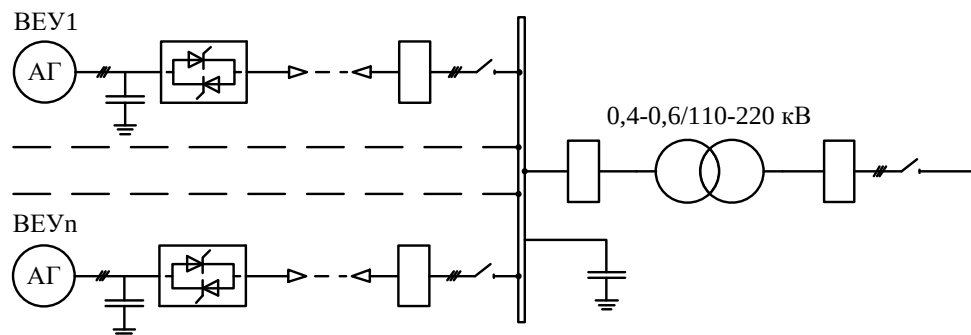


Рисунок 1.11 – Вітроенергетична станція невеликої потужності на базі вітроенергетичних установок з асинхронними генераторами з короткозамкненим ротором

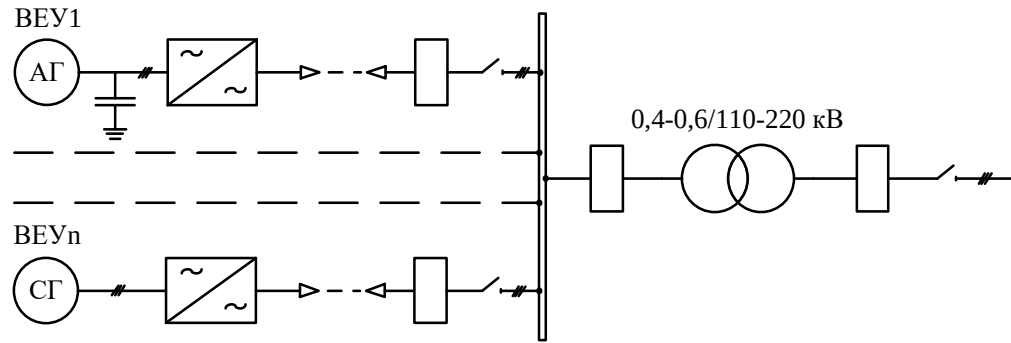


Рисунок 1.12 – Вітроенергетична станція невеликої потужності на базі вітроенергетичних установок з асинхронними або синхронними генераторами непостійної частоти обертання і повним перетворенням виробленої потужності

На рис. 1.13-1.15 наведені схеми ВЕС, які побудовані по радіальній схемі з використанням трансформаторів середньої напруги при ВЕУ.

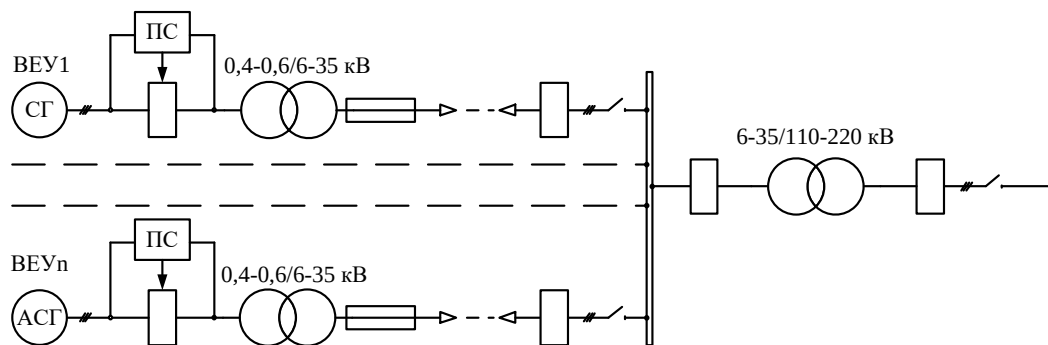


Рисунок 1.13 – Радіальна схема з'єднань вітроенергетичних станцій на базі вітроенергетичних установок із синхронними генераторами

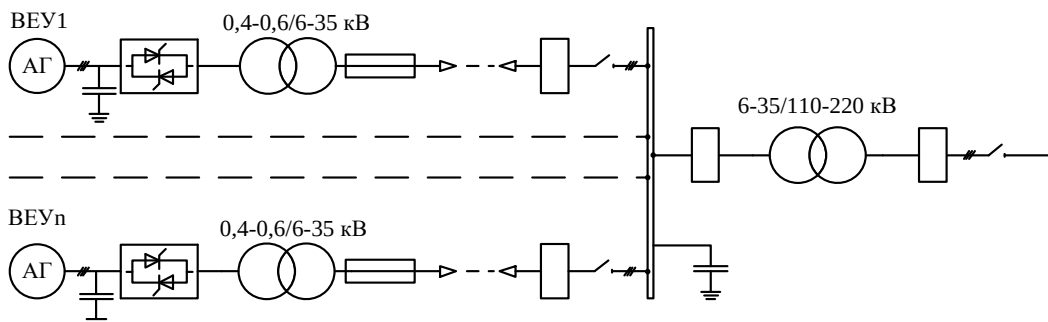


Рисунок 1.14 – Радіальна схема з'єднань вітроенергетичних станцій на базі вітроенергетичних установок із асинхронними генераторами з короткозамкненим ротором

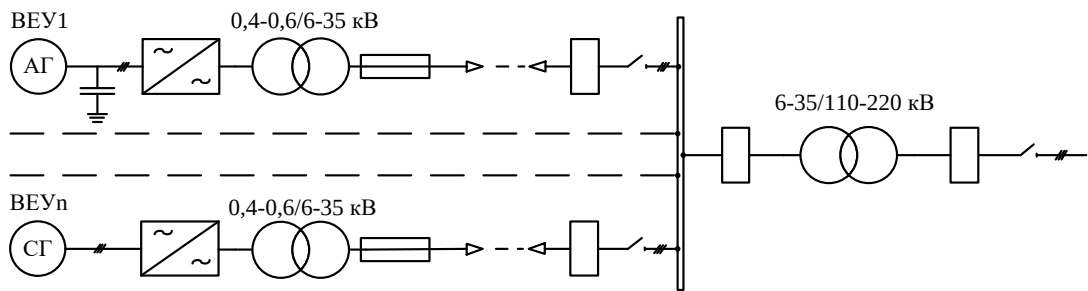


Рисунок 1.15 - Радіальна схема з'єднань вітроенергетичних станцій на базі вітроенергетичних установок з асинхронними або синхронними генераторами непостійної частоти обертання і повним перетворенням генеруючої енергії

При сприятливій геометрії рози вітрів може спостерігатися підключення декількох ВЕУ на один трансформатор (рис. 1.16).

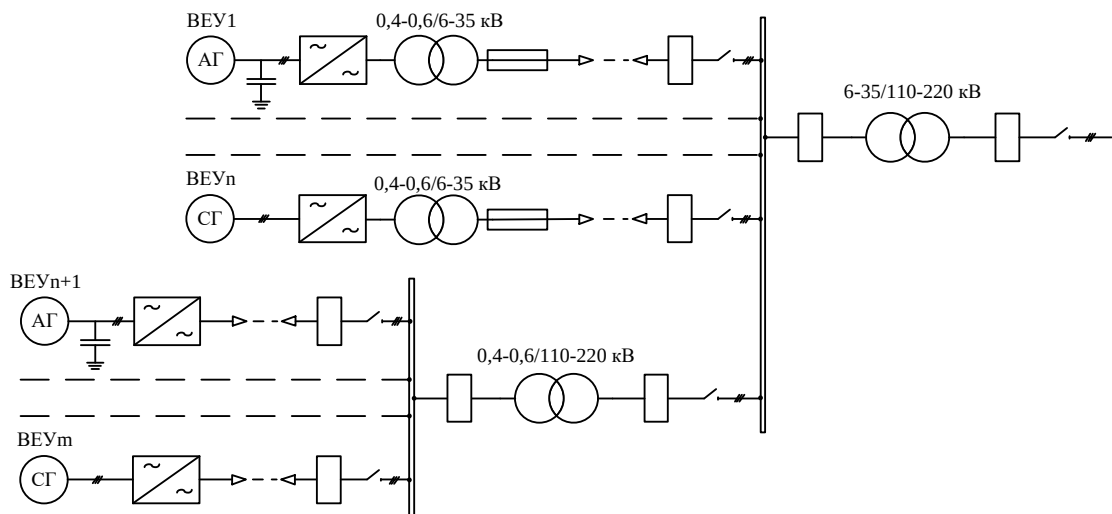


Рисунок 1.16 – Варіант складнорозгалуженої радіальної схеми вітроенергетичних станцій

Зазначимо, що застосування ВЕУ на базі різних за принципом дії і конструкцією електричних генераторів спостерігається в основному при модернізації або розширенні діючих ВЕС [19, 54–56, 61]. На рис. 1.13-1.15 показані різні генератори як можливі варіанти для відповідних схем електричних з'єднань. У новостворених ВЕС з експлуатаційних міркувань

використовуються ВЕУ однакової конструкції й одного типорозміру [54–56, 62].

Враховуючи специфіку розташування [63–66] та специфіку підключення ВЕС до розподільчої мережі [13–14, 65–67] гірничо-збагачувального комбінату є необхідним детальний аналіз режимів роботи ВЕС в даних умовах.

1.7 Аналіз існуючих рішень систем керування вітроенергетичними установками та вітроенергетичними станціями

На даний момент у кожній європейській енергосистемі (UCTE, Nordel, UK, Ireland) існують окремі технічні вимоги з підключення ВЕС в мережу. Єдиних вимог щодо оцінки можливості паралельної роботи ВЕС і ЄЕС не вироблено, але при цьому в кожному документі є певні загальні вимоги [68–71]:

- підтримання якості ТТ;
- зниження втрат у мережах, що містять ВЕС;
- вирішення питання компенсації реактивної потужності, якщо до складу ВЕУ входять FU;
- усунення гармонік, що генеруються інверторами, якщо ВЕУ містить перетворювачі частоти (ПЧ);
- усунення радіоперешкод;
- захист ВЕУ від позаштатних ситуацій (коротке замикання, відключення ПЧ і т.д.).

На даний час існує два основних типи ВЕУ: з постійною і змінною швидкістю обертання. До кінця дев'яностих років минулого століття, концепція змінної швидкості не була поширена на ринку. Нині ВЕУ з постійною швидкістю обертання, як і раніше, є найбільш популярною конструкцією, проте нові вимоги привели до появи установок зі змінною швидкістю обертання. Для регулювання вихідної потужності використовуються три основні стратегії:

- пасивний контроль із фіксованим кроком;
- змінне управління кроком;
- активний контроль.

Однак, узагальненої стратегії для всіх типів установок не існує. Проте, зі збільшенням потужності ВЕУ виявляється тенденція до активного контролю.

Конфігурація ВЕУ з фіксованою швидкістю обертання заснована на мультиплікаторі з АГ з короткозамкненим ротором. АГ використовуються з метою скорочення витрат. Одним із головних недоліків ВЕУ з фіксованою частотою обертання є не найкраща аеродинамічна ефективність, особливо при роботі з частковим навантаженням. З точки зору енергетичної системи, іншим важливим недоліком є негативний вплив на напругу мережі, через споживання реактивної потужності [52–53, 72–73].

Альтернативою цієї схеми є компоновка з короткозамкненим АГ з контролем ковзання. У цій схемі, коли ковзання регулюється безперервно, при зміні електричного опору ротора, невеликі зміни в обертових коливаннях швидкості (близько 10% вище синхронної) можуть бути компенсовані без зміни вихідної частоти генератора.

З метою досягнення можливості регулювання швидкості застосовують:

- двохшвидкісні генератори (використання більш низьких швидкостей вітру підвищує продуктивність і знижує рівень шуму);
- АГ зі змінним опором для низького діапазону швидкостей;
- АГ подвійного живлення;
- системи з прямим приводом багатополюсних СГ;
- гібридні системи (комбінація багатополюсних генераторів з невеликими мультиплікаторами).

Особливий інтерес на ринку представляють генератори подвійного живлення, також звані генераторами з індукційним ротором. У цих машин обмотки статора безпосередньо підключені до мережі, в той час як

перетворювач частоти встановлений між ротором і мережею. Велика частина енергії виробляється обмоткою статора, але при цьому перетворювач частоти може виробляти до третини від загальної вихідної потужності, в залежності від режиму роботи. Ця схема дозволяє установці контролювати ковзання в генераторі і, таким чином, швидкість ротора може змінюватися для досягнення більшої аеродинамічної ефективності [11, 47, 53].

Крім того, перетворювач керує величиною кута повороту лопаті, напругою ротора і фазою, також можливе часткове управління активною і реактивною потужністю.

Нарешті ще один підхід, який добре зарекомендував себе в офшорних ВЕУ, являє собою багатополосні СГ, підключені до мережі через джерело електронного перетворювача, який керує виробництвом ЕЕ. Ця концепція, звана також машиною з прямим приводом, може використовувати широкий діапазон швидкостей завдяки широким можливостям частотного перетворювача. Генератор може працювати практично на будь-якій швидкості обертання, при цьому відслідковуючи оптимальну швидкість для різних вітрових умов. Серед головних переваг цього підходу – низькі витрати на технічне обслуговування і висока надійність через відсутність навантаження на мультиплікаторі, поліпшена аеродинамічна ефективність і здатність контролю напруги мережі.

Таким чином, описані системи управління ВЕУ дозволяють ефективно використовувати ВЕУ, завдяки можливості контролю за якістю ЕЕ та роботі в широкому діапазоні швидкостей.

1.8 Формування мети та завдань наукового пошуку

Викладений вище матеріал дозволяє визначити мету досліджень – розробку теоретичних аспектів і практичних рішень щодо підвищення енергоефективності електропостачання територіально віддалених споживачів енергії гірничо-збагачувальних комбінатів шляхом упровадження в структури систем їх електропостачання автономних джерел енергії на основі вітрових

генеруючих установок з енергоефективними функціональними характеристиками електромеханічних комплексів.

Базуючись на аналізі наявних методів і заходів підвищення електричної ефективності електротехнічних комплексів вітроенергетичних установок з акцентом на умови гірничо-збагачувальних комбінатів, та згідно з метою даного наукового пошуку формалізовані такі наукові завдання для досліджень:

- обґрунтувати можливість та оцінити доцільність і потенціал досяжності енергоефективності застосування вітроенергетичних комплексів для автономного живлення віддалених приймачів електричної енергії у складі систем електропостачання гірничорудних комбінатів, з метою зменшення втрат електричної енергії та підвищення надійності роботи всього електроенергетичного комплексу;

- форматизувати потенціал та окреслити кордони оптимальних електроенергетичних параметрів, котрі можуть бути досягнені в реальних умовах розбудови вітроенергетичних автономних джерел живлення у складі існуючих систем електропостачання гірничо-збагачувальних комбінатів;

- доопрацювати методику розрахунку потужностей електротехнічного обладнання для оцінювання і вибору потужностей вітроенергетичних станцій при змінах параметрів вітрових потоків в умовах відвалів і шламосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів;

- на основі відомих варіантів структур вітроенергетичних комплексів модернізувати варіант розбудови енергоефективного електроенергетичного комплексу для живлення топографічно віддалених електроенергоспоживачів – відвалів пустих порід і технологічних шламосховищ гірничо-збагачувальних фабрик типових гірничо-збагачувальних комбінатів;

- доопрацювати метод синтезу структур електромеханічних комплексів у частині підвищення їх енергоефективності і розповсюджено на новий клас автономних джерел живлення вітроенергетичних комплексів для

зменшення втрат потужності в електричних мережах в умовах залізорудних комбінатів;

– розробити математичну модель і на її основі дослідити енергетичні складові процесу функціонування автономних електромеханічних систем у складі багатомодульного електрогенеруючого комплексу як сегмента загальної електричної мережі залізорудного комбінату.

1.9 Висновки до розділу 1

На основі підтверджених недоліків існуючих систем електропостачання та підвищення їх функціональних можливостей шляхом реструктуризації у варіант систем з розподіленою генерацією для умов гірничо-збагачувальних підприємств визначено мету дисертаційної роботи – розробка теоретичних аспектів і практичних рішень щодо підвищення енергоефективності електропостачання територіально віддалених споживачів енергії гірничо-збагачувальних комбінатів шляхом упровадження в структури систем їх електропостачання автономних джерел енергії на основі вітрових генеруючих установок з енергоефективними функціональними характеристиками електромеханічних комплексів.

Для досягнення необхідного рівня енергоефективності вітроенергетичної станції в умовах гірничо-збагачувальних комбінатів необхідне створення відповідного електромеханічного комплексу, а також слід:

- проаналізувати стан відновлювальних енергетичних ресурсів;
- проаналізувати ефективність і втрати електроенергії в розподільчих електричних мережах промислових підприємств;
- оглянути існуючі рішення систем керування вітроенергетичними установками та вітроенергетичними станціями;
- проаналізувати системи електропостачання залізорудних підприємств;

- дослідити розрахунково-технічний вітровий потенціал залізрудних підприємств;
- розглянути існуючі структури вітроенергетичних станцій, способи підключення і режими функціонування їх у складі розподільчих мереж гірничо-збагачувальних комбінатів;
- проаналізувати фактори впливу на основні енергетичні показники вітроенергетичної станції в умовах залізрудних підприємств;
- проаналізувати особливості роботи вітроенергетичних станцій у розподільних електричних мережах підприємства;
- дослідити очікуваний енергоефективний діапазон режимів функціонування електротехнічного комплексу вітроенергетичної станції;
- розробити та провести оцінювання варіанта структури електропостачання підприємства з використанням вітроенергетичної станції;
- розробити алгоритм функціонування системи керування електропостачання залізрудних підприємства з використанням вітроенергетичної станції;
- проаналізувати особливості прогнозування виробітку потужності вітроенергетичною станцією в умовах залізрудних підприємств;
- розробити імітаційну модель і дослідити електромеханічну систему керування вітроенергетичною станцією; а також:
 - моделювання режимів роботи вітроенергетичної станції;
 - розрахунок витрат на розробку системи живлення від вітроенергетичної станції;
 - розрахунок обсягів генерування електричної енергії та економічного ефекту від упровадження вітроенергетичної станції.

РОЗДІЛ 2. БАЗОВІ ЗАСАДИ ДО ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАНЦІЙ В УМОВАХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

2.1 Узагальнена характеристика систем електропостачання типового вітчизняного гірничо-збагачувального комбінату

Технологія проектування та спорудження вітчизняних ГЗК носить формат уніфікованості та однорідності. Це ствердження стосується як технологічної топографії розбудови структур ГЗК так і систем електропостачання та споживачів ЕЕ.

Враховуючи цей факт і не вдаючись до віртуальності проаналізуємо, для більшої наглядності та достовірності результату, системи електропостачання та їх енергетичні характеристики на прикладі діючого ГЗК «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат», який є «наймолодшим» серед своїх аналогів та характеризується значним рівнем спорідненості з іншими комбінатами України.

Так як комбінат має повний технологічний цикл, то всі його виробництва діляться по переділах:

- гірничо-транспортний комплекс;
- переробний комплекс (дробильна фабрика, збагачувальна фабрика, цех виробництва окатишів);
- допоміжний комплекс (цех шламового господарства, теплосиловий цех, цех мереж і підстанцій, ПКО «Кисень» і т. д.)

Комбінат, як і всі ГЗК в Україні, є вельми енергоємним підприємством. Джерелом електропостачання комбінату є головна понижувальна підстанція «Кременчуцька-330», яка отримує електроенергію по магістральних лініях 330 кВ: «Миргород», «Полтава» (Північна енергосистема), Кременчуцька ГЕС, «Дніпро» (Дніпровська енергосистема), Система електропостачання комбінату складається з живильних, розподільчих, трансформаторних

підстанцій і зв'язуючих їх кабельних і повітряних мереж, а також струмопроводів напругою вище 1000 В. Електропостачання комбінату здійснюється по восьми дволанцюгових лініях 154 кВ: ВЛ-154 кВ ГПП-4 № 1 і № 2 – АС-150, L=19,3 км живить головні понижувальні підстанції № 4/1, № 4/2, № 4/3 (гірничий комплекс, електрифікована залізнична (контактна) мережа) ;

Всі ГПП комбінату запитані за схемою «глибокого вводу», що дає можливість мати найменшу кількість ступенів трансформації, (лінія-трансформатор). Сумарна встановлена потужність трансформаторів складає 772 МВт, що забезпечує безперебійне живлення електроенергією споживачів.

Підстанції, що знаходяться на балансі ЦСП, здійснюють розподіл електроенергії по переділах технологічного циклу комбінату.

Категорії надійності електропостачання приймачів електричної енергії кар'єра:

- глибинний водовідлив (шахта дренажна) – I категорія;
- поверхневий водовідлив – III категорія;
- екскаватори – III категорія;
- бурові верстати – III категорія;
- електрифікований транспорт (контактна мережа) – III категорія;
- ремонтні майстерні – III категорія.

Для забезпечення електропостачання споживачів Дніпровського рудоуправління в ЦСП створено ділянку підстанцій «Рудник». Умовно кар'єр поділений на західний і східний борти, відповідно і підстанції розташовані за східним і західним бортах. До складу ділянки підстанцій «Рудник» входять:

Західний борт:

– ГПП-4/1 (понижувальна), РП - «Західне», підстанції 35/6 - «Південно-Західна № 1», «Південно-західна № 2» – здійснюють електропостачання споживачів кар'єра західного борту;

– ГПП-4/1 (тягова), ГПП-4/3 (тягова) – здійснюють електропостачання контактної мережі залізничного цеху західного борту;

Східний борт:

– ГПП-4/2 (понижувальна), підстанція 35/6 – «Східна», РП «Північно-східне», РП «Південне» – здійснюють електропостачання споживачів кар'єра східного борта;

– ГПП-4/2 (тягова) – здійснюють електропостачання контактної мережі залізничного цеху східного борта;

Особливі небезпечні аварійні ситуації по переділах комбінату при відключенні ЕЕ:

1. Дніпровське рудоуправління: відключення ЕЕ на п/ст 35/6 «Шахта» веде до зупинки шахтного водовідливу. Час відключення не більше ніж на 30 хвилин.

2. Цех шламового господарства: відключення ЕЕ по ПНС-1 і ПНС-2 веде до зупинки насосів НП-800 і затоплення пульпонасосних. Час відключення не більше ніж на 20 хвилин.

3. Відключення ЕЕ за іншими переділами призводить до зупинки під навантаженням устаткування і можливого виходу з ладу приладів за його подальшому запуску.

Система електропостачання підприємства складається з живильних, розподільних, трансформаторних підстанцій і зв'язуючих їх кабельних і повітряних мереж, а також струмопроводів напругою вище 1000 В.

Вимоги, що пред'являються до електропостачання підприємств враховують технологію виробництва і споживану потужність.

Встановлена потужність споживачів ЕЕ підприємства становить більше 100 МВт. Схема електропостачання комбінату побудована таким чином, щоб вся система була економічна, надійна, зручна і безпечна в обслуговуванні та забезпечувала необхідну якість ЕЕ як в нормальному так і післяаварійному режимах [6, 11, 14].

При побудові схеми електропостачання врахована специфічна особливість окремих промислових цехів, зокрема наявність зон із забрудненим і агресивним середовищем, «особливих» груп електроприймачів, що вимагають підвищеної надійності живлення, електроприймачів з різкозмінним ударним навантаженням та інші. Ці чинники обумовлюють додаткові вимоги до систем електропостачання. Враховано також специфічні особливості роботи окремих виробництв, технологічних процесів, зокрема режимів роботи найбільш відповідальних агрегатів, що забезпечують протікання технологічних процесів.

Вимоги технології видобутку ЗРС зробили істотний вплив при визначенні ступеня надійності живлення і структури схем електропостачання.

Водночас, передбачені раціональні заходи щодо оптимізації електроспоживання і вирівнюванню графіка навантаження [6, 11, 14]. Для розвантаження джерел живлення в години максимуму навантаження передбачена спільно з технологістами можливість вибірково відключати частки електроприймачів в допустимих межах технічної і економічної доцільності, що забезпечує оптимальне зниження навантаження в години максимуму без шкоди для планів випуску продукції – ЗРС.

Окрім вищезгаданого до СЕП гірничих підприємств висуваються жорсткі вимоги щодо надійності їх функціонування.

У схемах електропостачання підприємства в частині надійності чітко різняться аварійний і післяаварійний режими [6, 11, 14]. Система електропостачання побудована таким чином, що вона при післяаварійний режимі забезпечує функціонування основних виробництв підприємства після необхідних переключень і перез'єднання. При цьому використовуються всі додаткові джерела і можливості резервування, в тому числі і ті, які при нормальному режимі нерентабельні (різні перемички, зв'язки на вторинних напругах і ін.). При післяаварійному режимі допустимо часткове обмеження подаючої потужності; можливі короточасні перерви живлення

електроприймачів третьої і частково другої категорій на час перемикань і перез'єднання [74–75].

У зв'язку з тим, що підприємство споживає значну (250 МВА) потужність, а централізоване джерело живлення віддалене, то прийом ЕЕ підприємством здійснюється на головних понижувальних підстанціях (ГПП) 150/35/10/6 кВ.

Системи електропостачання ГЗК будуються таким чином, що всі їх елементи постійно перебувають під навантаженням. «Холодний» резерв в лініях і трансформаторах не застосовується. При такому режимі роботи знижені втрати ЕЕ і збільшена надійність, так як довго перебуваючи у бездіяльності «холодний» резервний елемент може при його включенні відмовити в роботі внаслідок будь-яких несправностей, що опинилися непоміченими. Так званий «прихований» резерв передбачений в самих схемах електропостачання, які при післяаварійному режимі приймають на себе навантаження споживача (споживачів), що вибув шляхом перерозподілу її між частинами мережі, які залишилися в роботі [76–77].

В системах електропостачання застосовується глибоке секціонування всіх ланок системи від джерела живлення до збірних шин низької напруги ТП.

Система електропостачання враховує роздільну роботу ліній і роздільну роботу трансформаторів, так як при цьому знижені струми короткого замикання, спрощені схеми комутації та релейний захист.

При побудові схеми електропостачання ГЗК, які мають в своєму складі електроприймачі з різкозмінним ударним навантаженням, передбачені заходи з обмеження частих і значних коливань напруги, що викликаються поштовхами цих навантажень: застосування на ГПП трансформаторів з розщепленими обмотками вторинної напруги з коефіцієнтом розщеплення k_p не менше 3,5, з виділенням на одну з гілок обмотки живлення різкозмінних ударних навантажень, а на іншу спокійних

навантажень, включаючи освітлення.

Внутрішні електричні мережі виконуються за змішаними схемами (магістральна і радіальна) в залежності від територіального розміщення електричних навантажень, їх значення, необхідного ступеня безперебійності електропостачання.

Схеми будуються за ступінчастим принципом. Число ступенів визначається споживаною потужністю і розміщенням електричних навантажень на території підприємства. Зазвичай застосовуються дві-три ступені. При більшій кількості ступенів ускладнюються комутації, захист і експлуатація [76–77].

Превентивний аналіз втрат ЕЕ в електричних мережах гірничих підприємств показав, що втрати ЕЕ у внутрішніх ЛЕП сягають 25-28 %, в свою чергу втрати в приймачах 25-38 %, що неприпустимо (рис. 2.1) [4, 6–7, 78–79]. Визнано, що розподільні мережі є найбільш проблемним і затратним фактором електропостачання територій [80–81].

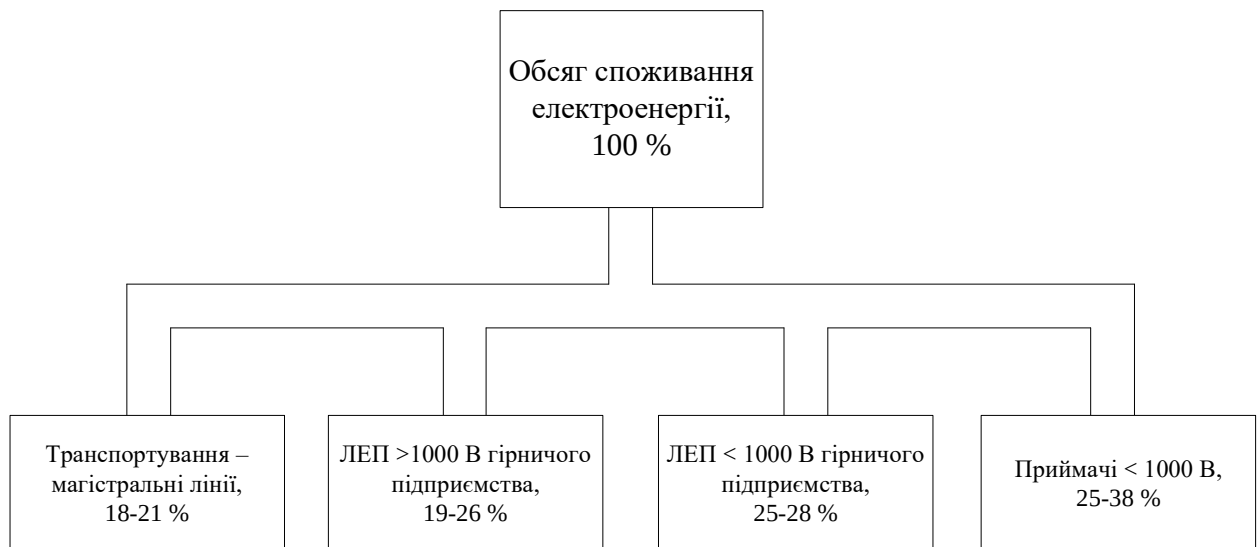


Рисунок 2.1 – Втрати електричної енергії в структурі: виробник-споживач

2.2 Електропостачання віддалених споживачів електричної енергії гірничо-збагачувальних комбінатів та оцінювання можливостей і варіантів включення в їх структури автономних джерел енергії

Як зазначалося в попередніх розділах даного дослідження технологія функціонування сучасних вітчизняних ГЗК з збагачення залізних руд аутентична. Це стверджується на практиці та диктує відповідну однорідність та топологічність розбудови структур ГЗК і логіку формату електропостачання споживачів ЕЕ в тому числі технологічних механізмів цехів шламосховищ та відвалів «пустих порід». Як зазначалось в розділі 1 даного дослідження технологічне обладнання цеху шламового господарства типового вітчизняного ГЗК споживає 15-18% від усього споживчого обсягу підприємства і є другим, після рудозбагачувальної фабрики, за обсягом споживання ЕЕ суб'єктом енергоспоживання [4, 6, 11, 80].

Уже саме цей факт відкидає всі сумніви щодо доцільності чи недоцільності ведення досліджень з пошуку знаходження шляхів підвищення енергоефективності саме цих об'єктів електроенергетики ГЗК.

Як свідчать результати досліджень [13–14], важливим моментом в тематиці досліджень є факт оцінювання ефективності експлуатуємих структур (їх архітектури), видів та параметрів ЛЕП, котрі транспортують ЕЕ від ГПП до споживачів шламосховищ і відвалів, тощо (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Параметри ліній електропередач і встановлених електричних потужностей технічного обладнання шламосховищ та відвалів пустих порід гірничо-збагачувальних комбінатів*

№ п/п	ГЗК	Загальна протяжність ЛЕП, км	Загальна електрична потужність приймачів, мВт	Загальні втрати ЕЕ в ЛЕП, %	Середня частота хибних відключень в годинах доби (в період 2015- 2021 р.)
1	ІнГЗК (м. Кривий Ріг)	21	38	37	2
2	ПівдГЗК (м. Кривий Ріг)	18	36	33	3
3	Арселор Мітал (м. Кривий Ріг)	12	32	29	1
4	ЦГЗК (м. Кривий Ріг)	12	30	29	3

* Параметри наведені в табл. 1 взяті з проектних документів, частота відключень з відповідних журналів ГЗК, а втрати ЕЕ підраховані.

5	ПівнГЗК (м. Кривий Ріг)	22	38	37	3
6	ПолтГЗК (м. Горішні Плавні)	22	36	36	2
7	СхГЗК (м. Жовті Води)	18	16	29	2

Як свідчать дані табл. 2.1 протяжність ЛЕП, котрі живлять приймачі шламосховищ ГЗК значні і в середньому сягають більше 17 км. Враховуючи те, що ЛЕП, згідно технології функціонування ГЗК, виконуються у тимчасовому варіанті і в більшості своїй в пересувному вигляді, то значення втрат електроенергії в них, як і частоти хибних несанкціонованих відключень, не дає приводу для оптимізму при оцінюванні рівнів ефективності їх функціонування [4, 6, 11, 72].

Сучасна архітектура СЕП вищезазначених суб'єктів електропостачання формується на основі відомих класичних варіантів: радіальна – з одно або з двостороннім живленням, або петльова – як правило з двостороннім живленням [32, 44–45].

При цьому технічна та технологічна наповненість цих варіантів СЕП формується на вимогах ПУЕ та ПТБ [82–83], згідно котрих обов'язковими тут мають бути перш за все критерії безперебійності електропостачання та можливості швидкого демонтажу та нарощування кількості споживачів ЕЕ.

В свою чергу, перша із вищезазначених вимог базується на тому, що в більшості своїй споживачі ЕЕ шламосховищ відносяться до споживачів першої категорії (пульпонасоси, землеснаряди), і навіть в цій структурі класифікуються, як особлива група [82], де перерва в енергопостачанні котрих допускається лише на час автоматичного вимкнення резервного живлення. Тому структура ЛЕП виконується на варіанті живлення мінімум як від двох ГПП ГЗК (рис. 2.2).

Проте структури і технічне виконання ЛЕП живлення цих локальних технологічних суб'єктів енергогосподарства ГЗК, не здатні забезпечити потрібний рівень безперервності в електропостачанні. Головна причина тут

полягає у тому, що ЛЕП електропостачання по фактам близькості до кар'єрів, де майже щонедільно проводяться вибухові роботи з відповідними викидами на денну поверхню шматків гірських порід з значним радіусом відповідних вражень, що задля збереження цілісності ЛЕП потребує часткового їх демонтажу та відключення на період проведення цих робіт.

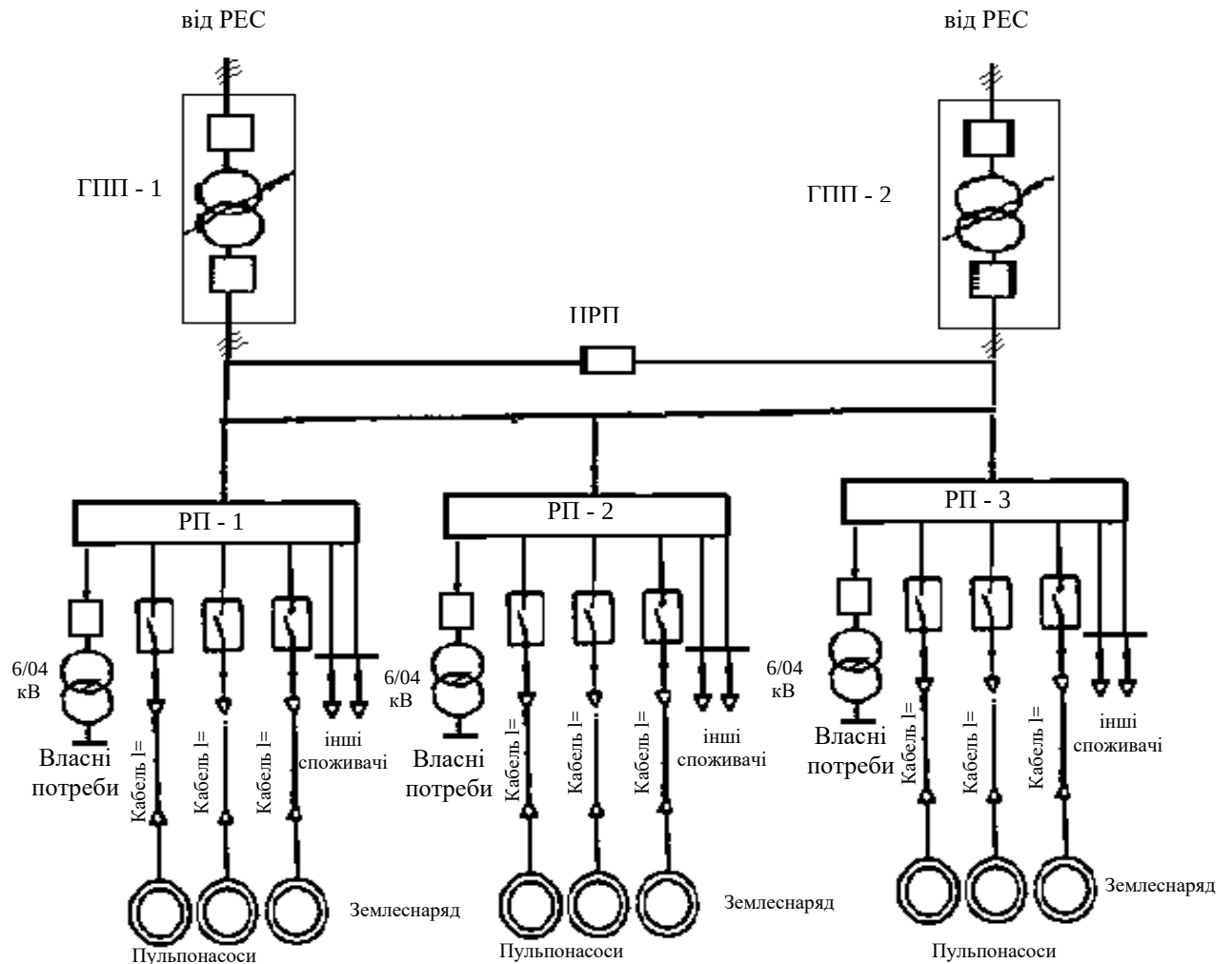


Рисунок 2.2 – Спрощена однолінійна схема електропостачання цеху шламового господарства типового гірничо-збагачувального комбінату

Як доповнення до цього зазначимо, що експлуатуємомі в поточному періоді часу на вітчизняних ГЗК локальні системи електропостачання шламосховищ й відвалів пустих порід, як складові загальних систем електропостачання комбінатів, у більшості своїй проектно не скоординовані з технологічною схемою, не мають необхідного рівня техніко – економічного

обґрунтування і в зв'язку з цим являють собою зразки малоефективних з значним відтінком аварійності енергетичних комплексів.

Необґрунтованою неурою ці технологічно непрості та важливі складові процесу функціонування ГЗК, обділені перш за все з боку відповідних проектних організацій, котрі недоречно віднесли ці технологічні ланцюги переробки ЗРС до категорії допоміжних суб'єктів господарств комбінатів.

В значній мірі саме це є причиною відсутності необхідної методики структурування систем електропостачання даних об'єктів, котра б враховувала особливості і параметри технології їх функціонування, територіальне розташування, потенціал можливостей їх розвитку і т. п., а також їх електроенергетику (потужність приймачів, віддаленість від ГПП і т. п.).

Свою негативну складову в неуразі до СЕП аналізуємих суб'єктів ГЗК зіграв і продовжує грати і людський фактор.

Вочевидь у значній мірі фривольне відношення до процесу споживання ЕЕ цими суб'єктами ГЗК, позначається в практиці експлуатації де не спостерігається прийняття необхідних заходів у вирішенні саме їх рівня енергоефективності оскільки, ці складові процесу «електропостачання – електроспоживання» не є системоутворюючим варіантом у вирішенні комплексної проблеми з підвищення енергоефективності в масштабах усього комбінату.

У незначній по кількості відповідній технічній літературі [4, 6, 11, 15, 48, 72, 80], хоч і в явно обмеженому варіанті, та все ж, можна знайти окремі штрихи підходу до створення методики оцінювання та вибору оптимального варіанту з структур СЕП, для аналізуємих суб'єктів електроенергетики ГЗК.

В табл. 2.2 показані, отримані згідно методики, конкретні розрахункові показники цих порівнянь.

Таблиця 2.2 – Упереджене оцінювання техніко-економічних показників варіантів локальних структур систем електропостачання електроприймачів шламосховищ та відвалів гірничо-збагачувальних комбінатів

№ п/п	Складові витрат	Рівні витрат, відносні одиниці (радіальна (+) /петльова (-))					
		ГЗК - 1	ГЗК - 2	ГЗК - 3	ГЗК - 4	ГЗК - 5	ГЗК - 6
1	Вартість втрат електричної енергії на протязі року	0,63/068 (-0,05)	0,92/0,78 (+0,14)	0,42/0,44 (-0,02)	0,52/0,23 (+0,29)	0,89/0,63 (+0,26)	0,64/0,59 (+0,05)
2	Очікувані втрати протягом року	0,05	0,007	0,009	0,005	0,007	0,007
3	Приведені витрати	1,0/1,34 (-0,34)	1,55/1,55 (±0)	2,76/1,74 (+1,02)	1,00/1,09 (-0,09)	1,46/1,75 (-0,29)	1,94/1,24 (+0,70)

Аналіз табл. 2.2 свідчить, що техніко-економічні показники обох варіантів структур електропостачання не значно різняться між собою, а вибір того чи іншого варіанту залежить від конкретики: площі території, її ландшафту та кількості і потужності споживачів ЕЕ.

Як свідчать результати досліджень [11, 53, 58, 67, 72–73], в тому числі автора [13–15, 78–79, 84–87], таких перепон – недоліків з комплексу вищезазначених впливових факторів, не існує у варіанті структур мереж з джерелами розділеної генерації ЕЕ. Це ствердження базується на ряді базових для оцінювання ефективності таких структур та додаткових фактах, де перш за все виділяється: незалежність проекту від площі та ландшафту і лише часткова, по дотичній залежність архітектури розбудови СЕП, з визначенням місць та кількості ВЕУ та диспозицію їх розташування в складі ВЕС [14, 66, 88].

Та все ж, два постулати являються головними і домінуючими факторами варіанту розосередженої генерації СЕП: мінімізація втрат напруги живлення в живильній мережі та забезпечення достатнього рівня надійності (безперебійності) електропостачання приймачів даних суб'єктів ГЗК.

2.3 Визначення факторів впливу на основні енергетичні показники вітроенергетичної станції в умовах залізорудних підприємств

На підставі даних спостереження швидкостей вітру згідно реальних висот дослідниками виведено узагальнюючі формули для визначення швидкості вітру по висоті [19–22, 14, 66, 89–90]. Найбільш простим для визначення швидкості вітру згідно висоти від 5 м і вище є вираз [14, 66]:

$$V_1 = V_0 \cdot \left(\frac{H_1}{H_0} \right)^k \quad (2.1)$$

де V_1 – швидкість вітру на заданій висоті; V_0 – швидкість вітру на відомій висоті (для метеостанцій прийнято 10 м); H_1 – задана висота; H_0 – висота виміру; k – емпіричний показник шерховатості підстиляючої поверхні.

Із наведеної вище формули логічно зрозумілими виглядають майже всі складові крім степені k . Значення k в більшості робіт приймається $k=0,143$ [14, 66]. В нормативних документах рекомендують $k=0,2$. В США, для різних місць представлені значення 0,2–0,26. При вимірах на різних висотах, значення k досягає 0,34 [19–22, 89–90]. В окремих працях для України використовується $k=0,167$. Тим не менш підбір значень потребує обережності [14, 66].

Так як місцем для встановлення ВЕС розглядаються відвали та шламосховища, що являють собою повністю відкриті ландшафти, то степеневий показник шерховатості в такому випадку буде рівнятись 0,2.

Питома щільність повітря ρ величина не стала і залежить від тиску, температури і кількості водяної пари в повітрі. Щільність водяної пари менше щільності сухого повітря, тому вологе повітря при тому ж тиску буде мати меншу щільність, ніж сухе. Якщо розглядати повітря як ідеальний і сухий газ, то залежність щільності повітря від тиску і температури набуває наступного вигляду [19–22]:

$$\rho = \frac{p}{R_s T} \quad (2.2)$$

де p – тиск повітря; R_s – питома газова стала; T – температура повітря.

При нормальному атмосферному тиску (на рівні моря $p_0 = 101325$ Па) і температурі повітря 0 °C отримаємо:

$$\rho_0 = \frac{p}{R_s \cdot T} = \frac{101325}{287,058 \cdot 273,15} = 1,292 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (2.3)$$

Водночас, аналізуючи та використовуючи відомі залежності для визначення швидкості повітряних потоків (вітру) треба враховувати специфіку технології видобутку ЗРС. Так, при розробці ЗРС відкритим (кар'єрним) способом в атмосферу можуть виділятися газоборазні радіоактивні речовини, основним з яких є радон, образований при розпаді радія. Вміст в повітрі робочої зони шкідливих газів і парів у відповідності до вимог не повинно перевищувати певних норм.

В той же час, при відкритому способі розробки ЗРС в атмосферу виділяється пил, який являє собою концентрацію маленьких твердих крупинок розміром менше 0,1-0,5 мм. [91].

Так як наявність пилу у повітрі значно впливає на густину повітря, то основними характеристиками, які визначають мікроклімат кар'єрів та відвалів ГЗК, з позицій накопичення і виносу шкідливостей, являються швидкість повітря, його температурний режим і вологість атмосфери.

Швидкість повітря в цих сегментах технології функціонування ГЗК визначається швидкістю повітря на поверхні і конкретного температурного режиму в самому об'єкті [91]. При швидкості вітру на земній поверхні більше 2 м/с – вона – швидкість вітрового потоку в реальному місці визначається енергією вітрового потоку, при меншій – термічним фактором. Існує добовий і річний період зміни швидкості вітру на поверхні, швидкість вітру в кар'єрі зазвичай менша, ніж на поверхні, а на відвалах дещо більша. Термічні сили, які визвані прогрівом або охолодженням повітря, можуть суттєво змінювати швидкість повітря в цих об'єктах і формувати повітряні потоки горизонтальні – до 3 м/с, а висхідні – до 5 м/с.

Температура повітря визначається відповідно температурою повітря на поверхні, адіабатичним зчепленням повітря, тепловіддаючими і теплопоглинаючими процесами в кар'єрах і станом його атмосфери. Вона

також змінюється протягом доби та за рік. Зазвичай температура повітря в кар'єрах та відвалах вище, ніж на земній поверхні, внаслідок природного зжаття, нагріву порід сонцем і наявністю додаткових джерел тепла (машин і механізмів), причому у північної сторони температура повітря вище, ніж у південної сторони [30, 91].

Кар'єри, відвали та шламосховища є частиною земної поверхні. Тому повітрообмін у них у значній ступені визначається тими ж факторами, що і повітрообмін над земною поверхнею в цілому: швидкістю вітру і розподілом температури в приземному шарі повітря [30, 91].

Найбільш ефективно провітрюється кар'єри та відвали при застосуванні вітрової енергії, причому, чим вище швидкість вітру – тим краще провітрювання. В цьому випадку утворюється або вільний, або напівграничний струмінь, який виносить з них пил. Вільна струя утворюється при великому куті відкоса бортів кар'єрів і тому зустрічається частіше, ніж напівгранична.

Схема провітрювання вільним струменем називається рециркуляційною, оскільки наявність зворотного струменя другого роду приводить до багатократної циркуляції (рециркуляції) деякої частки повітря в об'ємі аналізованих технологічних складових ГЗК (рис. 2.3) [30, 91]. При цьому вільний струмінь буде приносити до борту шкідливі речовини [91].

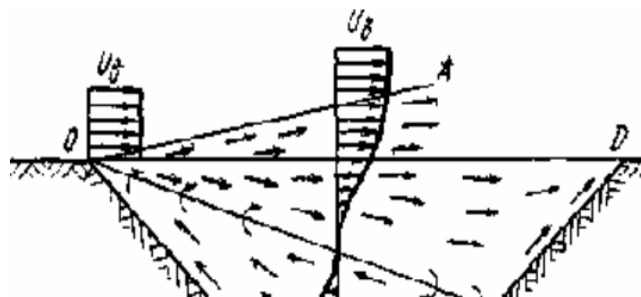


Рисунок 2.3 – Вільний струмінь, який виносить шкідливі речовини

Якщо представити відвал у формі пагорба, то на рис. 2.4 зображено характер обтікання кар'єрного відвалу.

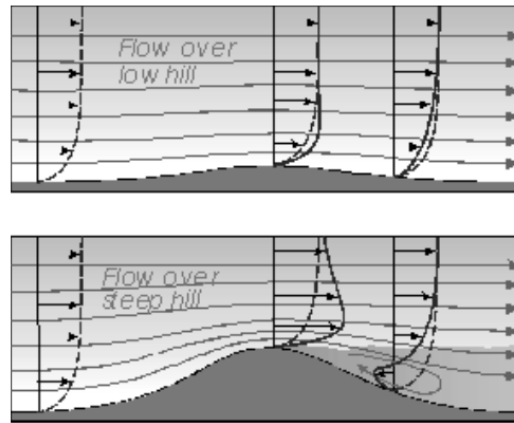


Рисунок 2.4 – Характер обтікання пологого (вгорі) та крутого (внизу) схилів (штрихова лінія відповідає незбуреному потоку)

Для підтримання повітряної атмосфери на задовільному рівні в кар'єрах та шламосховищах застосовується штучна вентиляція [91].

Штучна вентиляція необхідна в випадках, коли інтенсивність повітрообміну виявляється замалою для підтримання нормального санітарно-гігієнічного стану атмосфери в місцях ведення робіт.

Способи штучної вентиляції поділяються на два класи: способи інтенсифікації природного повітряного обміну та способи власної штучної вентиляції [91].

До способів власної штучної вентиляції відносяться:

- вентиляція за допомогою труб та виробок;
- вентиляція вільними струями, які створюються спеціальними вентиляторними установками.

Аналізуючи все вище зазначене можна зробити висновок, що запиленість суттєвого впливу на генерацію електричної енергії за допомогою БЕУ не буде мати.

Підсумовуючи, всі вищезазначені фактори впливу на основні енергетичні показники ВЕС можна показати у вигляді структури, яка зображена на рис. 2.5.

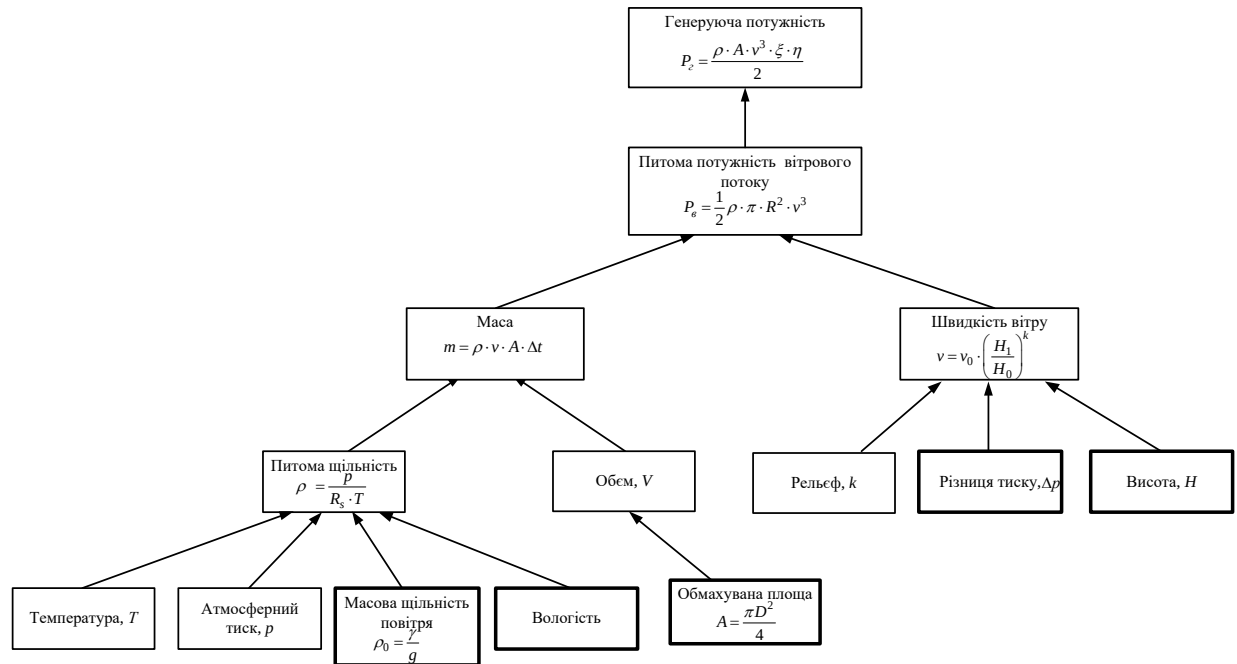


Рисунок 2.5 – Фактори впливу на основні енергетичні показники вітроенергетичної станції: D – діаметр вітроколеса; γ – питома вага повітря; g – прискорення сили тяжіння; R_s – питома газова стала; v_0 – швидкість вітру на заданій висоті; H_1 – задана висота; H_0 – висота виміру; ξ – коефіцієнт використання енергії вітру; η – коефіцієнт корисної дії генератора

2.4 Особливості роботи варіантів вітроенергетичних генераторів електричної енергії з потужною мережею електропостачання-електроспоживання підприємства

Особливістю вимог до роботи ВЕУ є забезпечення її стійкого функціонування в умовах безперервної пульсації швидкості вітру [14, 19, 93–94].

Простою схемою ВЕС, яка представлена на рис. 2.6, є паралельна робота декількох ВЕУ на загальні шини з видачою потужності через підвищуючий трансформатор в ЛЕП. В указаній схемі до джерела живлення з напругою U_s через трансформатор з активним опором R_t і індуктивністю L_t підключені: шунт $R_{ш}$, $L_{ш}$, два АГ G_1 , G_2 і сумарна ємність їх системи збудження C .

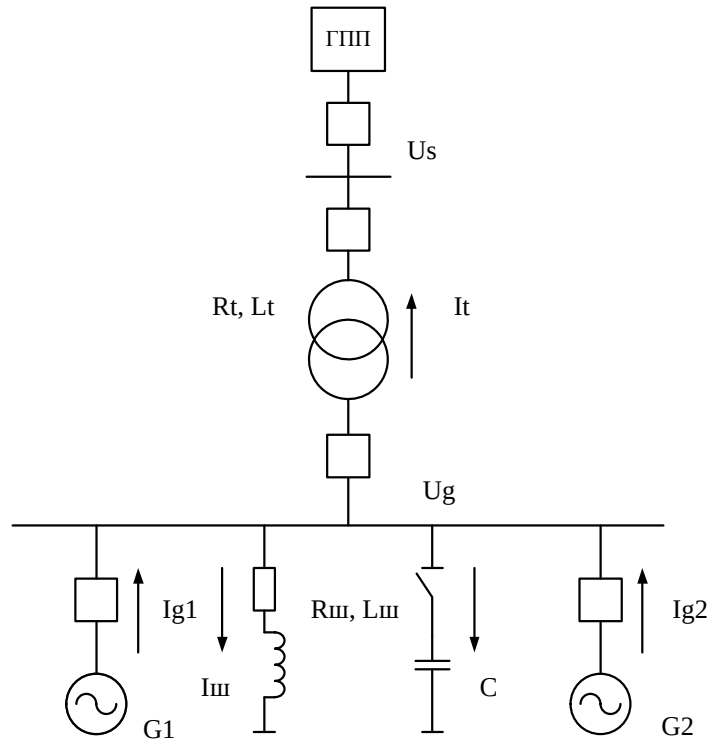


Рисунок 2.6 – Схема заміщення системи електропостачання з застосуванням вітроенергетичної станції

Диференційні рівняння трансформатора і шунта в осях x , y , ω_k мають вигляд [14, 19]:

$$\begin{aligned} pI_t &= \frac{1}{L_t} \cdot (U_g - U_s) - \frac{R_t}{L_t} \cdot I_t - j \cdot \omega_k \cdot I_t; \\ pI_{ш} &= \frac{1}{L_{ш}} \cdot U_g - \frac{R_{ш}}{L_{ш}} \cdot I_{ш} - j \cdot \omega_k \cdot I_{ш}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

АГ з конденсаторним самозбудженням представляє собою простий асинхронний електродвигун з коротко замкнутим ротором в якому відбувається електромагнітне перетворення механічної енергії обертання ротора в ЕЕ генеруючого струму.

Відповідно до рівнянь загальної електричної машини диференційні рівняння АГ можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned}
0 &= U_g + R_s \cdot I_g + p\psi_s + j \cdot \omega_k \cdot \psi_s; \\
0 &= R_r^{(1)} \cdot I_r^{(1)} + p\psi_r^{(1)} + j \cdot (\omega_k - \omega) \cdot \psi_r^{(1)}; \\
0 &= R_r^{(2)} \cdot I_r^{(2)} + p\psi_r^{(2)} + j \cdot (\omega_k - \omega) \cdot \psi_r^{(2)}; \\
p\omega &= \left(\frac{1}{j} \right) \cdot (M_T - M_E),
\end{aligned} \tag{2.5}$$

де $R_s, R_r^{(i)}, L_{\sigma s}, L_{\sigma r}^{(i)}, i=1,2$ – активні опори та індуктивності розсіювання статора і ротора; L_m – індуктивність взаємоіндукції; $\psi_s, \psi_r^{(i)}, \psi_m$ – потокозчеплення статора, роторних контурів і гілки намагнічування; $I_g, I_r^{(i)}$ – струми статора і роторних контурів; M_E – електромагнітний момент генератора; M_T – момент обертання вітротурбіни.

До включення конденсаторів збудження АГ, напруга U_g може бути визначена з балансів струмів у вузлі в диференціальній формі:

$$pI_t + pI_{uu} - pI_g + j \cdot \omega_k \cdot (I_t + I_{uu} - I_g) = 0 \tag{2.6}$$

Після підстановки складових можна отримати:

$$U_g = \frac{1}{Y} \cdot \left[\frac{U_s}{L_t} + \frac{R_t}{L_t} I_t + \frac{R_{uu}}{L_{uu}} I_{uu} - \frac{R_s}{L_{\sigma s}} \cdot (1 - a_s) \cdot \gamma_g - \frac{E_r}{L_{\sigma s}} \right] \tag{2.7}$$

де $E_r = \sum_{i=1}^2 a_r^i \cdot (p\psi_r^i + j \cdot \omega_k \cdot \psi_r^{(i)})$ – еквівалентна ЕРС двохконтурного ротора

АГ; $Y = \frac{1}{L_t} + \frac{1}{L_{uu}} + \frac{1 - a_s}{L_{\sigma s}}$ – власна інверсна індуктивність вузла.

Взаємозв'язок між параметрами вітру (середня швидкість, поривність), вітроколеса (число модулів, кут розвороту лопатей) і моментом вітротурбіни є достатньо складною, але при дослідженні електромагнітних перехідних процесів з частотою затухання менше 0,5 с величина M_T може бути прийнята постійною [19, 37].

Дещо по іншому виглядають параметри функціонування електромеханічних систем ВЕУ з СГ. Перш за все, цікавим вбачається питання

функціонування ВЕУ з СГ у варіанті включення на паралельну роботу і регулювання його активної і реактивної потужностей. При цьому, фактом є те, що, як правило, потужність мережі набагато більша потужності СГ, а напруга і частота мережі постійні.

При включенні СГ на паралельну роботу необхідно виконання чотирьох умов, які називаються умовами точної синхронізації:

- 1) Дійсні значення фазних ЕДС генератора повинні бути рівні дійсним значенням фазних напруг мережі.
- 2) Частота ЕДС генератора повинна бути рівна частоті мережі.
- 3) ЕДС генератора і напруга мережі повинні мати зсув по фазі 180° .
- 4) Генератор і мережа повинні мати однаковий порядок чередування фаз.

Регулювання реактивної потужності СГ, який працює паралельно з мережею, можливе зміною струму збудження. Після виконання умови синхронізації та включення на паралельну роботу, струм в обмотці статора СГ рівний нулю [19].

При роботі СГ на мережу великої потужності його напруга залишається незмінною і рівною напрузі мережі. При збільшенні струму збудження (перезбудження генератора) між мережею і статором СГ з'явиться вирівнюючий струм [19].

Статична система збудження побудована по принципу фазового компанування і реалізує електромагнітне додавання двох складових струму збудження, пропорційних напрузі і струму генератора, які здвинуті відносно одне одного кутом, який залежить від характеру навантаження.

Стійка паралельна робота генератора з мережею підприємства можлива лише при наявності статизму по реактивній потужності. Статизм по реактивній потужності (S_Q) визначається у відсотках від напруги холостого ходу U_0 :

$$S_Q = \frac{U_0 - U_n}{U_0} \cdot 100\% \quad (2.8)$$

Система самозбудження забезпечує збільшення струму збудження генератора з ростом його навантаження. Так як при паралельній роботі СГ з мережею $U_c = U_c$, то при відсутності статизму при збільшенні потужності Q буде збільшуватися струм збудження, що приведе до подальшого росту реактивної потужності і процес буде продовжуватися до виходу генератора з ладу. Величина статизму по реактивній потужності повинна складати 3-4 % [19, 37].

2.5 Особливості роботи вітроенергетичної станції у варіантах розподільчих електричних мереж гірничорудних підприємств

В руслі переходу від оптового ринку ЕЕ єдиного покупця до балансуєчого і до електропостачання за двосторонніми договорами в останні роки спостерігається перехід від централізованого до комбінованого електропостачання, що означає зростання кількості локальних джерел ЕЕ [94].

Вплив ВЕС на режими розподільчої електромережі підприємства суттєво залежить від значення сумарного розосередженого генерування в ній, від одиничної встановленої потужності ВЕС та їх типу, а також від їх місця під'єднання в електричній мережі [94].

Як зазначалося раніше, аналіз втрат електроенергії в електричних мережах гірничих підприємств показав, що втрати електроенергії у внутрішніх ЛЕП сягають 25-28 %, в свою чергу втрати в приймачах 25-38 % (рис. 2.2) [4, 6–7, 78–79].

Втрати в системі електропостачання можна розрахувати використовуючи загальну методику [44, 95–96].

Для обчислення втрат ЕЕ в проводах ліній необхідні наступні дані [97–98]:

- а) каталожні або паспортні
- довжина лінії L , км;

- питомий активний опір лінії r_0 , Ом/км;
- питомий реактивний опір лінії x_0 , Ом/км;
- б) активна ЕЕ WP (кВт·год.) та реактивна ЕЕ WQ (кВАр·год), що проходить по лінії, приймається по розрахункових лічильниках;
- в) кількість годин роботи лінії за розрахунковий період T_n ;
- г) номінальна напруга лінії U_H , кВ.

При обчисленні втрат ЕЕ послідовно визначається:

- а) активний опір лінії, R_e , Ом:

$$R_e = r_0 \cdot L \quad (2.9)$$

- б) реактивний опір лінії X_e , Ом:

$$X_e = x_0 \cdot L \quad (2.10)$$

- в) середній струм в лінії I_{cp} , А:

$$I_{cp} = \frac{\sqrt{WP^2 + WQ^2}}{\sqrt{3}U_H T_n} \quad (2.11)$$

- г) втрати ЕЕ в трьох фазах лінії – втрати активної ЕЕ, кВт·год:

$$\Delta WP = 3I_{cp}^2 \cdot R_e \cdot T_n \cdot 10^{-3} = \frac{WP^2 + WQ^2}{U_H \cdot T_n} \quad (2.12)$$

- втрати реактивної ЕЕ, кВАр·год:

$$\Delta WQ = 3I_{cp}^2 \cdot X_e \cdot T_n \cdot 10^{-3} = \frac{WP^2 + WQ^2}{U_H \cdot T_n} \quad (2.13)$$

Враховуючи те, що буде додано додаткове джерело ЕЕ отримаємо:

$$\Delta WP = 3I_{cp}^2 \cdot R_e \cdot T_n \cdot 10^{-3} = \frac{W(P_M - P_e)^2 + W \pm Q^2}{U_H \cdot T_n} \quad (2.14)$$

Втрати реактивної електроенергії в даному випадку не розглядаються, тому що на підприємствах гірничо-видобувної галузі $\cos\varphi$ складає близько 1.

Як бачимо з формули зі збільшенням потужності генерації від ВЕС загальні втрати будуть зменшуватись.

Згідно [94] виходячи з типових схем приєднання ВЕС до розподільних мереж, за певних потужностей генерування вони частково компенсують потоки потужності, що обумовлені навантаженням споживачів, а надходження ЕЕ з боку системи буде зменшуватись. Разом з цим зменшуються втрати ЕЕ і в розподільних мережах. В загальному їх можна оцінити як [94–96]:

$$\Delta W = \frac{S_{сист}^2}{U_n^2} \cdot r_{ек} \cdot k_{\phi}^2 \cdot T_n = \frac{(P_{нав} - P_{\varepsilon})^2 + (P_{нав} \cdot tg \varphi_n - P_{\varepsilon} \cdot tg \varphi_{\varepsilon})^2}{U_n^2} \cdot r_{ек} \cdot k_{\phi}^2 \cdot T_n, \quad (2.15)$$

де $S_{сист}$ – повна потужність, що надходить до шин приєднання ВЕС з боку системи у режимі середніх навантажень; $P_{\varepsilon}, P_{нав}$ – середні потужності, відповідно, ВЕС та суміжного навантаження; U_n – номінальна напруга електричної мережі; $r_{ек}$ – еквівалентний опір електричної мережі; k_{ϕ} – коефіцієнт форми графіка навантаження споживачів, суміжних з ВДЕ; T_n – тривалість звітного періоду.

Вираз для наближеного визначення втрат ЕЕ в електричній мережі залежно від типу та потужності генераторів ВЕС має такий вигляд [94]:

– для випадку застосування СГ:

$$\Delta W_{СГ} = \frac{P_{\varepsilon}^2 (1 + tg^2 \varphi_{\varepsilon}) + P_{нав}^2 (1 + tg^2 \varphi_n)}{U_n^2} \cdot r_{ек} \cdot k_{\phi}^2 \cdot T_n - \frac{2P_{\varepsilon} \cdot P_{нав} (1 + tg \varphi_{\varepsilon} \cdot tg \varphi_n)}{U_n^2} \cdot r_{ек} \cdot k_{\phi}^2 \cdot T_n \quad (2.16)$$

– для випадку застосування АГ:

$$\Delta W_{АГ} = \frac{P_{\varepsilon}^2 + P_{нав}^2 \cdot (1 + tg^2 \varphi_n) - 2P_{\varepsilon} \cdot P_{нав}}{U_n^2} \cdot r_{ек} \cdot k_{\phi}^2 \cdot T_n \quad (2.17)$$

З метою оцінювання міри впливу різних типів генераторів ВЕС на втрати ЕЕ в розподільних мережах введено коефіцієнти впливу, що характеризують відношення втрат ЕЕ в розподільчих електромережах залізничного

підприємства після та перед введенням розосередженого генерування в експлуатацію [11, 13–14, 72]:

$$k_{\Delta W_{-CG}} = 1 + \frac{P_z^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_z)}{P_{\text{нав}}^2 \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_n)} - 2 \frac{P_z (1 + \operatorname{tg} \varphi_z \cdot \operatorname{tg} \varphi_n)}{P_{\text{нав}} \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_n)} \approx \left(\frac{P_z}{P_{\text{нав}}} - 1 \right)^2 \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} k_{\Delta W_{-AG}} &= 1 + \frac{P_z^2}{P_{\text{нав}}^2 \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_n)} - 2 \frac{P_z}{P_{\text{нав}} \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_n)} = \\ &= \left(\frac{P_z}{P_{\text{нав}}} - 1 \right)^2 \cos^2 \varphi_n + \sin^2 \varphi_n \end{aligned} \quad (2.19)$$

З наведених виразів видно, що збільшення втрат в розподільних мережах за рахунок роботи ВЕС матиме місце лише тоді, коли середня потужність генерування станцій буде вдвічі перевищувати аналогічний показник суміжного навантаження [94].

Оцінити вплив джерел енергії на втрати потужності у витках розподільчих електромережах можливо за результатами розрахунків усталених режимів [94]. Проте виділити в цих втратах складову від ВЕС є проблематично. Складність задачі оцінювання впливу режимів роботи ВЕС на втрати потужності в розподільчих електромережах полягає в тому, що втрати потужності залежать від перетоків у вітках схеми мережі нелінійно і використання методу накладання неможливо.

В практиці використовується низка методів, що дозволяють виконувати розрахунок зазначеної складової втрат як із заданою інформацією, так і з ймовірісно-статистичним оцінюванням втрат [94–95, 99]. Використання даних методів в розімкнених розподільних мережах призводить до виникнення похибки, допустимої на етапі планування. Однак, у замкнених розподільних електромережах збільшується вплив нелінійності функції втрат потужності, що може викликати суттєві помилки обчислення додаткових технічних втрат ЕЕ у випадку відхилення режиму розподільчих електромереж від планового [94–95, 99].

Для розв'язання зазначених проблем у [81, 94, 99–100] обґрунтовано можливість розв'язання задачі аналізу впливу окремих вузлів генерації на втрати в електромережах, спираючись на лінійні моделі усталеного режиму електромереж.

В роботах [94, 99–100] досліджено, що для випадку, коли зміна потужностей у вузлах ЕМ є незначною, тобто не викликає істотних (не більше 1 %) відхилень напруги у вузлах, залежність втрат потужності в електромережах від потужностей у її вузлах можна вважати лінійною. Отже, для дослідження впливу ВДЕ на втрати потужності в розподільних мережах з прийнятною точністю можна використовувати метод накладання.

Розосереджене генерування електроенергії в розподільних електричних мережах змінює перетоки потужності в них, що в свою чергу впливає на втрати ЕЕ. Виділити втрати в мережах від ВДЕ з сумарних втрат можна, використавши коефіцієнти розподілу втрат у вітках. Останні показують, яку частку в сумарних втратах в i -й вітці складає протікання по ній потужності від кожного вузла, в тому числі і від ВЕС [94, 99–100].

Для ВЕС зі встановленими потужностями більшими за 500 кВт необхідно враховувати їх вплив на режими електричних мереж 110(35) кВ.

Виходячи з цього, можна стверджувати, що ВЕС встановленою потужністю 100-500 кВт практично не впливають на характерні режими роботи електромереж 110(35) кВ і, таким чином, не вносять змін до матриці коефіцієнтів розподілу втрат потужності. Тобто, збільшення втрат потужності в розподільних мережах за рахунок роботи ВЕС буде лише у випадку збільшення значень елементів вектора S .

Однак, майже у всіх випадках приєднання ВЕС, враховуючи особливості режимів їх роботи, було зафіксовано зменшення потужності у вузлах їх приєднання для режимів максимальних і середніх навантажень. Пояснюється це тим, що навантаження централізованої системи електропостачання

частково компенсується ВЕС і розвантажуються лінії та трансформатори [94, 99–100].

У випадку генерування потужності безпосередньо в електромережі 10 кВ, що характерно для низки ВЕС, їх функціонування суттєво впливає на режими мереж. Отже, коефіцієнти розподілу втрат після врахування впливу таких станцій будуть змінюватися. Через те, що значення коефіцієнтів розподілу, які відповідають вузлу приєднання ВЕС, стають додатними за від'ємних значень потужності, розрахункові втрати потужності в електромережах зменшуються в діапазоні потужностей ВЕС 0-100 кВт або 0-200 кВт, залежно від режиму навантажень.

Подальше збільшення потужності генерування призводить до зміни напрямку потоків потужності і втрати потужності в електромережах зростають. При цьому зміна знаку коефіцієнтів розподілу втрат для вузлів приєднання ВЕС вказує на їх негативний вплив на втрати потужності і ЕЕ в електромережах [94].

Отже підтверджується позитивний вплив ВЕС встановленою потужністю до 500 кВт на втрати потужності у характерних режимах електромереж 110(35) кВ, а також втрати ЕЕ в них. Для електричних мереж 10 кВ через більшу чутливість режиму до приєднання ВЕС, особливо до електрично віддалених вузлів, діапазон потужностей генерування станцій, що супроводжується позитивним впливом на рівень втрат, обмежується значеннями 100-200 кВт в залежності від режиму електромереж [94].

Для ВЕС, встановлена потужність яких перевищує 100-200 кВт (приєднання до ЕМ 10 кВ) або 500 кВт (приєднання до електромереж 110(35) кВ, або шин підстанцій 110(35)/10(6) кВ), актуальною виявляється задача оптимізації схем приєднання таких джерел до електромереж. Ця задача вирішується відомим [11, 44, 52, 96, 100] методом визначення складових втрат потужності в електромережах, зумовлених функціонуванням окремих споживачів та джерел ЕЕ.

З [44, 94, 96] відомо, що частка втрат потужності в електричних мережах, зумовлена передачею потужності ВЕС, коли остання задається у вигляді транзитного струму $\dot{J}_{mp}$, залежить не тільки від його складових, але і від значень інших струмів, що протікають вітками електромережі. Міру залежності транзитної складової втрат від параметрів поточного режиму електромереж можна охарактеризувати коефіцієнтами взаємовпливу:

$$\mu'_i = 1 + 2 \frac{I'_i}{J'_{mp}}; \quad \mu''_i = 1 + 2 \frac{I''_i}{J''_{mp}}, \quad (2.20)$$

де $J'_{mp}, J''_{mp}, I'_{mp}, I''_{mp}$ – активна та реактивна складові струму, якими задаються транзитні потужності та інші струми, зумовлені власними навантаженнями електромережі.

Ці коефіцієнти можуть приймати довільні значення залежно від значення та напрямку струмів, що протікають і-ю віткою. Нульові значення відповідають відсутності у цій вітці струмів власних навантажень крім $\dot{J}_{mp}$ [94].

Вираз для визначення втрат потужності в електромережі від передачі потужності ВЕС може бути записаний:

$$\Delta P_{mp} = 3 \sum_{i \in M1} \left[J'^2_{mp} \cdot \mu'_i + J''^2_{mp} \cdot \mu''_i \right] \cdot R_i, \quad (2.21)$$

де $M1$ – множина віток електромережі, якими транспортується потужність ВЕС.

У випадку передачі потужності ВДЕ споживачеві, приєднаному до розподільної електромережі з ВЕС, крім втрат активної потужності, що зумовлені адресною передачею ЕЕ електричною мережею від ВЕС до споживача, слід враховувати складову втрат, яка зумовлена передачею ЕЕ від центру живлення до споживача. Ця складова враховує передачу енергії на покриття небалансу між договірним та реальним електропостачанням, а також втрат від адресного перетоку [53, 94].

Таким чином, сумарні втрати активної потужності, що викликаються ВЕС у випадку передачі потужності електричною мережею до заданого споживача, визначаються так [94]:

$$\Delta P_{\Sigma mp} = 3 \sum_{i \in M1} \left[J_{mp}'^2 \cdot \mu_i' + J_{mp}''^2 \cdot \mu_i'' \right] \cdot R_i + 3 \sum_{j \in M2} \left[\Delta J_{mp}'^2 \cdot \mu_{\Delta j}' + \Delta J_{mp}''^2 \cdot \mu_{\Delta j}'' \right] \cdot R_j, \quad (2.22)$$

де j – номер вітки електричної мережі; $M2$ – множина віток схеми електромереж на шляху між основним центром живлення та вузлом призначення адресного перетоку потужності ВДЕ.

Якщо за технологічним процесом генерування активної потужності на ВЕС пов'язане з генеруванням або споживанням реактивної потужності, то [58]:

$$j_{mp} = \frac{\hat{S}_{mp}}{\sqrt{3} \hat{U}_{BEC}}. \quad (2.23)$$

Для випадку, коли реактивна потужність цілком компенсується в межах балансової належності ВЕС (наприклад, застосування асинхронних генераторів з керованими засобами компенсації реактивної потужності), струм, який описує транзитний потік потужності від нього, визначається:

$$j_{mp} = \frac{P_{mp}}{\sqrt{3} \hat{U}_{BEC}} \quad (2.24)$$

В роботі [94] зазначено що, у випадку повної компенсації реактивної потужності засобами ВЕС, його вплив на режими роботи електромереж є меншим. Через це значення втрат від адресного перетоку потужності у більшості випадків також є меншими, порівняно з транспортуванням активної та реактивної потужностей.

Однак, в окремих випадках, якщо ВЕС видають потужність в електрично віддалені частини електромереж, то додаткове генерування реактивної потужності ВЕС може бути корисним з огляду на підвищення якості ЕЕ в електромережах [94].

2.6 Аналіз існуючих підходів до прогнозування рівнів генерування вітроенергетичною станцією в розподільчих електричних мережах залізничних підприємств

Інтегрування значних потужностей вітростанцій може серйозно впливати на роботу енергосистеми – її стабільність, надійність та економічність, а також істотно ускладнювати роботу диспетчерських служб. Це обумовлює ряд вимог до вітростанцій, виконання яких має передувати підключенню ВЕС до мережі. Зокрема, необхідні механізми компенсації змін потужності від номінальної до нульової протягом короткого часу. Виникають відповідні технічні вимоги до системи керування ВЕС. Гострота вимог залежить від точності передбачення поточної потужності.

Важливо прогнозувати швидкість вітру та відповідну потужність ВЕС, щоб планувати роботу енергосистеми відповідно до робочих графіків та договірних зобов'язань. Якщо частка вітрової енергетики значна, то навіть малі похибки у прогнозі поведінки вітру спричинять значну погрішність у визначенні активної потужності, натомість точний прогноз здатен максимізувати прибутковість та мінімізувати ризики.

Продуктивність ВЕС варіюється відповідно до поточного рівня швидкості вітру, тоді як енергосистема має утримувати баланс між генеруванням та споживанням енергії. Вплив змін потужності ВЕС на керованість та стійкість енергосистеми є важливим, якщо не найважливішим чинником. Так, потужна ВЕС, за відсутності відповідного регулювання, може стати вагомим дестабілізуючим фактором, що впливатиме на режими функціонування навіть сусідніх енергосистем [14, 66, 101].

Для утримання енергосистеми в стабільному стані виробники ЕЕ мають постійно пристосовуватися до змінного навантаження з боку споживачів, використовуючи також системи акумуляування [102]. Однак для ВЕС характерними є додаткові коливання потужності внаслідок непостійності вітру.

Якщо активна потужність ВЕУ може іноді бути знижена при зменшенні потреб у енергії, то збільшитись при зростанні потреб вона не може внаслідок обмеженої швидкості вітру. Тому чим більша частка вітрової енергії, тим важче утримувати баланс енергосистеми [102].

Вітрова енергія змінюється в часі, головним чином, внаслідок флуктуацій метеорологічних факторів. Ці зміни можуть тривати від кількох секунд до років.

Розуміння природи цієї мінливості та можливість передбачення, на думку фахівців Європейської вітроенергетичної асоціації, є пріоритетним питанням при інтегруванні вітроелектростанцій до енергомереж. Передбачуваність ВЕС – ключовий момент в уникненні істотних коливань потужності. Якщо значна кількість вітроелектростанцій має більш стабільну середню потужність за рахунок взаємодоповнення, то передбачуваність кожної окремої станції залежить від можливості спрогнозувати швидкість вітру. Це необхідно в тому числі з економічних мотивів, для зменшення обсягу резервних потужностей. Часова протяжність надійного прогнозу визначається умовами енергоринку та технічною спроможністю енергосистеми до компенсації перепадів потужності.

Потреба у прогнозуванні поточної продуктивності ВЕС залежить від рівня впровадження вітрової енергетики. Вважається, що при частці встановленої потужності ВЕС у загальному обсязі генеруючих потужностей на рівні 5 % потреба у точному прогнозуванні стає нагальною, а для рівня вище 10 % – необхідною [102–105]. Для інтегрування в енергомережі необхідно мати надійний інструментарій передбачень поточної потужності.

Методи прогнозування продуктивності ВЕС у Європі розробляються протягом останніх 20 років, при цьому зазвичай розглядають 48-годинний інтервал часу. Складність методів залежить від ступеню впровадження вітроенергетики та місцевих вимог операторів мереж.

Методи прогнозування вітрової енергії загалом можна розділити на дві категорії – фізичні та статистичні [103]. Перші призначені для дослідження ряду фізичних властивостей атмосфери та особливості її взаємодії з поверхнею Землі, другі забезпечують виявлення статистичних закономірностей в масиві результатів безпосередніх вимірювань. Фізичний метод має переваги при тривалому прогнозуванні, тоді як статистичний дієвіший при складанні короткострокових прогнозів. Проте ця класифікація досить відносна. Окремо фізичний і статистичний методи передбачень використовуються рідко, а зазавичай одночасно.

Для врахування місцевих умов використовуються дані метеорологічних служб (в Європі це моделі числового передбачення погоди – NWP-моделі) як вхідні змінні разом зі статистичними даними. Останнім часом розроблено також нові методи, засновані на штучному інтелекті, подібні до штучних нейронних мереж (ANN) [102] і моделей нечіткої або приблизної логіки (fuzzy logic). Сучасні гібридні моделі мають меншу похибку передбачень.

Потужність вітрових турбін напряму залежить від швидкості вітру (з урахуванням особливостей енергетичної характеристики), тому прогнозування швидкості вітру і потужності вітроустановок засноване на однакових принципах.

Вибір відповідних вхідних змінних важливий для побудов ефективної моделі прогнозування. Для різних моделей потрібні різні змінні: для фізичної використовується опис фізичних параметрів, таких як характер орографії, шорсткість поверхні, наявність перешкод, метеодані тощо; для статистичної важливими є історичні дані про роботу ВЕС і вихідні дані моделі NWP, що здебільшого використовуються як вхідні для оцінки кореляції офіційних метеоданих та фактичної продуктивності вітроустановок. Отже, фізичний підхід використовується для початкового аналізу, і його результати роблять статистичний метод ефективнішим. Проте це не завжди спрацьовує, адже для моделі просторової кореляції потрібні історичні дані щодо швидкості вітру як

даної площадки, так і сусідніх, а для прогнозу досяжної потужності потрібна ще і енергетична характеристика вітроустановок [104].

Сучасні методи статистичного прогнозування дозволяють з високою точністю прогнозувати практично всі показники.

Однак треба пам'ятати, що не існує універсальних методів прогнозування на всі випадки життя. Вибір методу прогнозування та його ефективність залежать від багатьох умов, і зокрема від необхідної довжини або часу прогнозування.

За часом прогнозування розрізняють короткостроковий, середньостроковий і довгостроковий прогноз.

Короткостроковий прогноз характеризує собою прогноз «на завтра», тобто прогноз на кілька кроків вперед. Для нього застосовують практично всі відомі методи: експоненціальне згладжування, авторегресійного проінтегрованого змінного середнього – АРПЗС (ARIMA) і нейронні мережі.

Середньостроковий прогноз – це зазвичай прогноз на один або на половину сезонного циклу. Для нього використовують АРПЗС і експоненціальне згладжування, які дозволяють відстежувати якість прогнозу в залежності від терміну прогнозу.

А при побудові довгострокового прогнозу стандартні статистичні методи прогнозування практично не використовують, і потрібне використання комплексних підходів. Наприклад, використання нейронних мереж або регресійних моделей [79, 105–107].

Для побудови прогнозу, важливо правильно розуміти терміни, використовувані при побудові моделей і добре ними оперувати. Це і виділення тренда, циклічної складової ряду, трендциклічної, сезонної складової та шумовий компоненти; і дослідження автокореляційної і приватної автокореляційної функції для знаходження сезонності; і побудова періодограми, і обчислення сезонного лага.

Після закінчення побудови певної моделі важливою процедурою є перевірка адекватності її побудови. Для цього можна, по-перше, провести візуальний аналіз із зсувом прогнозу на кілька кроків назад. А по-друге, скористатися аналізом залишків – стандартним методом перевірки адекватності будь-якої побудованої статистичної моделі.

Електроспоживання гірничих підприємств має специфічні особливості, викликані його випадковим характером, пов'язаним із впливом значного числа гірничо-геологічних, технологічних, виробничих, кліматичних та інших факторів, і являє собою складний нестационарний процес [106–107]. Тому прогнозування електроспоживання є важливим аспектом в електропостачанні гірничих підприємств.

2.7 Висновки до розділу 2

1. Аналіз системи електропостачання типового гірничо-збагачувального комбінату висвітлив можливість прийняття рішення про встановлення ВЕС на відповідних відвалах та шламосховищах та підключення до найближчої по розташуванню головної понижуючої підстанції.

2. Випередженням до процесу впровадження вітроенергетичної станції в розподільчу електромережу гірничо-збагачувального комбінату повинно бути оцінювання прогнозування можливо досяжних добових та місячних графіків генерування електроенергії, так як прогнозовані обсяги потенційного генерування електроенергії впливають на прогнозовані рівні споживання електроенергії підприємством із загальної мережі. Прогноз споживання електроенергії підприємством з мережі буде рівний різниці між споживанням електроенергії підприємством та прогнозом генерованої потужності вітроенергетичною станцією.

РОЗДІЛ 3. РОЗБУДОВА АРХІТЕКТУРИ ТА ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК В УМОВАХ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ КОМБІНАТІВ

3.1 Особливості розміщення вітроенергетичних станцій на відвалах та шламосховищах в умовах залізрудних підприємств

Як зазначалось в попередніх розділах дослідження, шламосховища та відвали ГЗК є «фізично» підготовленими об'єктами для спорудження ВЕС. Проте, вони мають і свої особливості, не враховуючи яких не можливо досягти достатнього рівня енергоефективності як ВЕУ окремо так і ВЕС загалом.

Першим позитивним технологічним фактом для розбудови ВЕС є те, що проектні висоти відвалів сягають більше 100 м над земною поверхнею, а як відомо, збільшення потенціалу з висотою пояснюється зростанням швидкості вітру, яка в приземному шарі змінюється за степеневим законом [17, 20–23, 34, 66]. Значний вплив на характер затінення здійснює мінливість напрямку вітру на протязі інтервалу вимірювання, яка реально спостерігається в умовах вітрового поля ВЕС. Отже, відстань L між центрами поверхні обмаху та зони затінення (або кут ψ відхилення вітру від напрямку на ВЕУ) має сприйматися як випадкова величина з певними числовими характеристиками.

У випадку розташування установок «в лінію», що характерно для гірських перевалів, узбережжя морів, офшорних парків на морській косі або використовуються магістральна схема [19–23]. При цьому, роза вітрів має стійку витягнуту форму з вираженими домінуючими напрямками, і лінія установок розташовується перпендикулярно бісектрисі сектора, цих напрямків.

Відстані між ВЕУ в ряду, в даному випадку можуть становити лише 3–4 діаметра віротурбіни, оскільки турбулентні сліди від віротурбіни не впливають на роботу сусідніх установок [19–23]. Таким чином, ВЕС, що

складається, наприклад, з 10 установок, розташована на морській косі, може мати протяжність магістрального кабелю близько 2500 м.

При розташуванні ВЕС на площах, де роза вітрів більш рівномірна, може бути застосована радіальна схема з головною підвищуючою підстанцією в геометричному центрі станції [19–23, 66].

В роботах [19–23] досліджено, що при рівномірній розі вітрів дистанції між окремими установками у всіх напрямках повинні бути однаковими, а їх величина повинна складати не менше 6-9, а за деякими джерелами – 20 діаметрів вітротурбін. Це пояснюється тим, що при робочих швидкостях вітру турбулентний слід від вітротурбін простягається у напрямку вітру саме на таку відстань. Отже, для ВЕС з діаметрами вітротурбіни 60-120 м. дистанції між окремими ВЕУ збільшуються до 600-1200 м. [17, 19–23].

Як показують практичні дослідження на ряді зарубіжних ВЕС, при розташуванні в ряд декількох ВЕУ найбільший спад швидкості в разі напрямку вітру вздовж ряду спостерігається на другій в ряду (першій з затінених) установці, надалі він зменшується, а на рівні 5-6 ВЕУ вітровий потік практично стабілізується [23, 66, 108].

На вітчизняних ВЕС, побудованих на базі ВЕУ типу USW56-100, відстані між сусідніми ВЕУ в ряду становлять іноді 1,5-2,0 D 0 (у світовій практиці відстані менше 4D не практикуються). При напрямі вітру вздовж ряду агрегати працюють, як правило, через один для уникнення впливу взаємозатінення, тому отримати практичні результати для розташованих поряд ВЕУ досить складно. Більш стабільний результат можна отримати, порівнюючи роботу ВЕУ в різних рядах при фронтальному напрямі вітру, тобто при затіненні одного ряду іншим. До речі, такий напрям вітру спостерігається найчастіше, таке орієнтування рядів ВЕУ при проектуванні ВЕС [66].

Для максимального використання вітрового потоку рекомендується розміщувати ВЕС рядами перпендикулярними переважному напрямку вітру на

відстанні $4D$ одна від одної. Зате у випадку поздовжнього вітру ($\varphi 0 - \varphi \approx 0^\circ$) їх показники значно гірші. Так, втрата швидкості вітру на 20-30% спричинить зменшення потужності ВЕУ на 30-40% і більше, залежно від абсолютних значень швидкості вітру. Якщо ж напрям вітру може рівномірно змінюватися, то ВЕС доцільно розміщувати в шахматному порядку між сусідніми станціями $4D$.

Тому це є дуже важливим питанням, так як остаточна величина втрат виробітку електроенергії залежить від того, наскільки переважаючий напрям вітру відповідає розташуванню рядів ВЕУ.

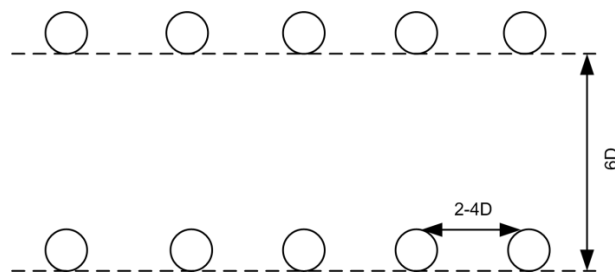


Рисунок 3.1 – Лінійна двохрядна схема

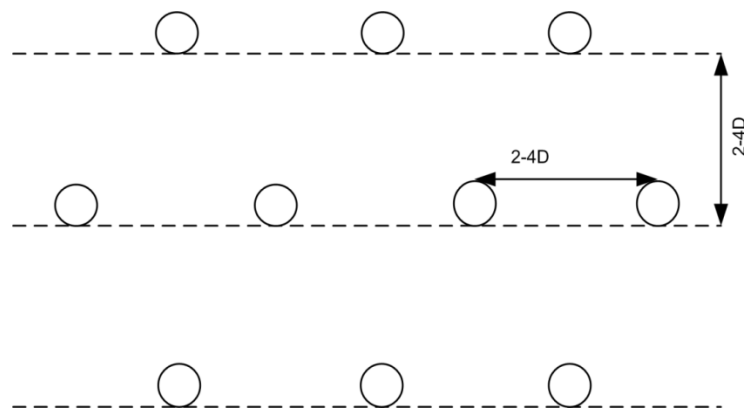


Рисунок 3.2 – Лінійна шахова рівномірна схема

Тоді, в першому випадку на площі S_T можна розмістити $S_T/(20D)^2$ установок, які дозволять отримати за рік ($T = 8760$ год) енергію, яка рівна:

$$W_T = \frac{P_{cp}}{1000} \cdot T \cdot \frac{S_T}{(20D)^2} \quad (3.1)$$

або

$$W_T = \frac{\pi}{8000} D^2 \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 \cdot \eta(V_i) \cdot t_i \cdot T \cdot \frac{S_T}{(20D)^2} \quad (3.2)$$

У другому випадку можна розмістити $S_T/(100D^2)$ установок, яка забезпечать технічний потенціал енергії вітру території:

$$W_T = \frac{P_{cp}}{1000} \cdot T \cdot \frac{S_T}{100D^2} \quad (3.3)$$

або з урахуванням градації вітру V_i :

$$W_T = \frac{\pi}{8000} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 \cdot \eta(V_i) \cdot T \cdot \frac{S_T}{100D^2} \quad (3.4)$$

Як бачимо технічний потенціал вітрової енергії не залежить від діаметру і як наслідок від одиничної потужності БЕУ.

Використовуючи статистичні дані було проведено аналіз середніх значень швидкості вітру по метеостанції м. Горішні Плавні, що зображено на рис. 3.3 [14, 88].

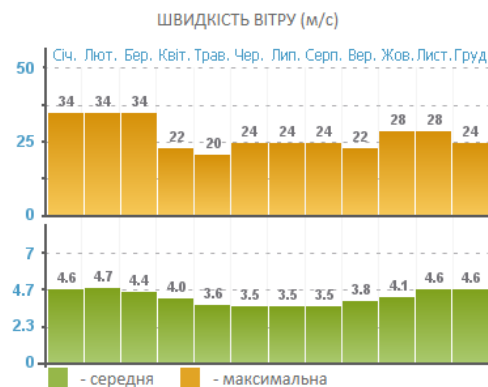


Рисунок 3.3 – Середньомісячна швидкість вітру по метеостанції м. Горішні Плавні

Виходячи з рис. 3.3 можна зробити висновок, що середньорічна швидкість вітру складає близько 4,1 м/с.

Раніше була розглянута можливість розташування БЕУ на відвалах кар'єрів гірничих підприємств [109].

Дослідження аеродинамічних характеристик кар'єрів склали наступну картину.

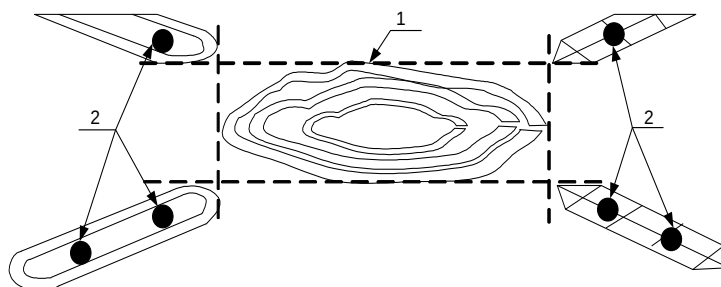


Рисунок 3.4 – Схема раціонального розташування вітроенергетичних установок на відвалах: 1 – відвал; 2 – місця розташування установок

На рис. 3.4 [109] як приклад показана схема раціонального розташування горизонтальноосьових ВЕУ на відвалах, що дозволяє досягти збільшення коефіцієнту використання вітрового потоку при будь-якому напрямі вітру на поверхні.

Так як встановлення ВЕС планується на відвалах залізорудного підприємства, то середньоперіодні швидкості вітру повинні бути перераховані на задану висоту відвалу (H) за формулою:

$$\mathcal{G}_H = \mathcal{G}_n \left(\frac{H}{h} \right)^{\bar{m}}, \quad (3.5)$$

де $\bar{m} = 0,6(\mathcal{G})^{-0,77}$, а $\bar{\mathcal{G}}$ - середньоперіодна швидкість вітру на висоті флюгера (h).

$$V_H = V_n (H/h)^m \quad (3.6)$$

де $m = 0,6(V_n)^{-0,77}$, а V_n – середньоперіодна швидкість вітру на висоті флюгера (h).

Висота східного та західного відвалів ПАТ «Полтавський ГЗК» складає 130 та 152 м відповідно.

$$V_{cx} = 4,1 \cdot \left(\frac{130}{10} \right)^{0,2} = 6,848 \text{ м/с.}$$

$$V_{3x} = 4,1 \cdot \left(\frac{152}{10} \right)^{0,2} = 7,065 \text{ м/с.}$$

Значення $t_i(\mathcal{G}_i)$ приймається з умови розподілу Вейбулла залежно від значення параметра (γ).

Власне вироблення ВЕУ протягом кожного місяця (N_{BEA}^{mic}) і року (N_{BEA}^{pik}) розраховується за формулами:

$$W_{BEA}^{mic} = \sum_{i=1}^k N_{BEA}(V_i) \cdot t_i(V_i) \cdot T_{mic}, \quad (3.7)$$

де T_{mic} - число годин в розрахунковому місяці.

$$W_{BEA}^{pik} = \sum_{i=1}^k N_{BEA}(V_i) \cdot t_i(V_i) \cdot T_{pik}, \quad (3.8)$$

де $T_{pik} = 8760$ годин.

Існує критерій визначення рентабельності і окупності ВЕУ. Згідно даному критерію середньорічна швидкість вітру повинна знаходитися в межах 5,1...5,9 м/с. Важливою характеристикою є вертикальний профіль вітру, тобто зміни його швидкості при зміні висоти в приземному шарі. По мірі збільшення висоти вплив земної поверхні на швидкість і напрям вітру зменшується [19–23, 35, 89–90]. Тому швидкість звичайно зростає, а поривчаста і прискорення потоку знижуються.

Розрахункова швидкість вітру для ВЕУ приймається на рівні 11-15 м/с. В умовах відвалів та шламосховищ ГЗК, як наведено раніше, швидкість атмосферного повітря може сягати зазначених значень та навіть перевищувати ці показники. Як показує практика, чим більша потужність ВЕУ тим більша для неї величина робочої швидкості повітря. Однак, у зв'язку з мінливістю швидкості вітру, велику частину годин в році ВЕУ виробляє потужність меншу номінальної.

3.2 Загальні питання до обґрунтування вибору структури електромеханічного комплексу вітроенергетичної установки

В ряді наукових пошуків з аналізуємої тематики [85–87, 108, 110–117] аналізувались, оцінювались та пропонувались різноманітні варіанти розбудови електромеханічних комплексів ВЕУ. Як можливі варіанти виступають і пропозиції за участю автора [13–15, 59, 84, 88].

Процес пошуку кращих, чи-то наближених до таких – оптимальних рішень, не зупинити, адже в значній мірі саме від того чи іншого варіанту залежить кінцевий результат – ефективність функціонування всього вітроенергетичного комплексу. На структуризацію створення ефективно-пошукового варіанту й націлені всі в минулому, та й в майбутньому, дослідження, в т. ч. автора.

У даний час для ВЕУ, згідно ряду техніко-економічних показників, найбільш поширеними є АГ із короткозамкнутим ротором [19, 39, 59, 118].

АГ підключається до мережі безпосередньо (рис. 3.5). Використання АГ із КЗ ротором дозволяє економити на додаткових системах керування, оскільки в разі використання саме асинхронної машини допускається менш точне підтримання частоти обертання вітрового колеса, а також АГ легше входить у синхронізм із мережею [40, 60].

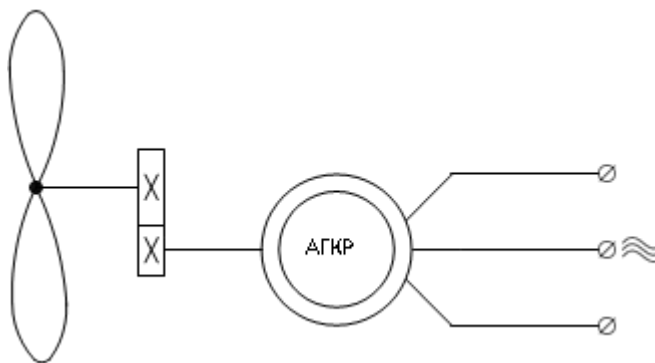


Рисунок 3.5 – Схема підключення вітроенергетичної установки із використанням асинхронного генератора з короткозамкнутим ротором

Іншим варіантом використання для ВЕУ АГ з КЗ ротором є схема із використанням безпосереднього перетворювача частоти (рис. 3.6). Така схема має більші можливості щодо генерації і покращення низки показників ЕЕ,

оскільки дозволяє використовувати АГ в режимі генератора і на досинхронних обертах [39–40].

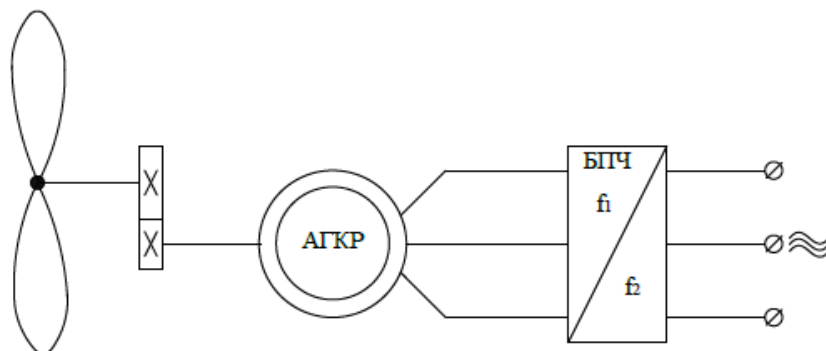


Рисунок 3.6 – Схема підключення вітроенергетичної установки із використанням асинхронного генератора з короткозамкненим ротором і безпосереднього перетворювача частоти

Однак використання для ВЕУ асинхронної машини має низку недоліків [19, 59–60], а саме:

- при одному і тому ж вітровому режимі вона виробляє менше енергії ніж синхронна машина;
- працює з меншим коефіцієнтом потужності, обумовленим значними струмами намагнічення, які пропорційні квадрату напруги;
- споживає реактивну потужність індуктивного характеру із мережі, що вимагає використання компенсуючих пристроїв;
- обмежена можливість керування швидкістю обертання ротора генератора, що зводиться до аеродинамічного керування вітроколесом або керування за допомогою зміни передаточного числа мультиплікатора, внаслідок чого додатково знижується загальний ККД ВЕУ.

Іншим варіантом електромеханічного перетворювача для ВЕУ є використання СГ. Найбільш проста схема, що зображена на рис. 3.7, включає в себе СГ, що працює паралельно з енергосистемою [52–53, 70].

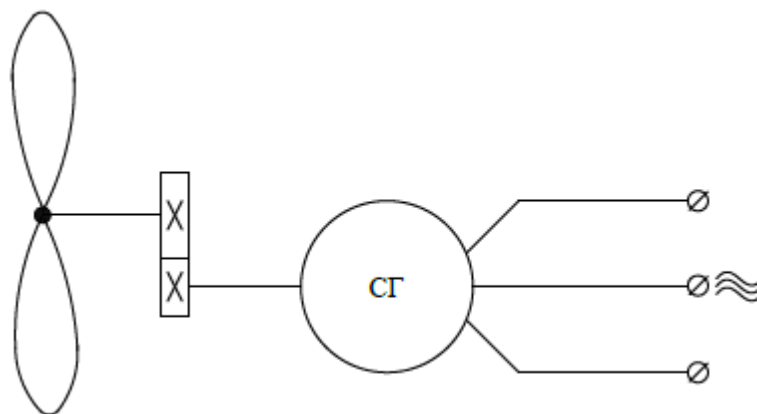


Рисунок 3.7 – Схема підключення вітроенергетичної установки із безпосереднім підключенням синхронного генератора до мережі

Оскільки, зазвичай, потужність енергосистеми набагато більша потужності ВЕУ, електрична машина буде знаходитися в синхронізмі в широкому діапазоні зміни потужності, що розвивається вітроколесом. Перевагою СГ над АГ є можливість генерації та регулювання як активної, так і реактивної потужностей, а також можливість регулювання напруги статора. Недоліки застосування синхронної машини із безпосередньою роботою на енергосистему, полягають у тому, що при певних вітрових умовах вона може переходити на роботу в режим двигуна і споживати енергію із енергосистеми, машина здатна до коливань при паралельній роботі з іншими агрегатами, а при різких поривах вітру з'являється велика імовірність випадання її із синхронізму. Наступна ж синхронізація машини і підключення її до енергосистеми є складним процесом [19, 40, 60, 119].

Значною мірою цих недоліків ВЕУ позбавляється при застосуванні безпосереднього перетворювача частоти, включеного між СГ та енергетичною системою, як показано на рис. 3.8.

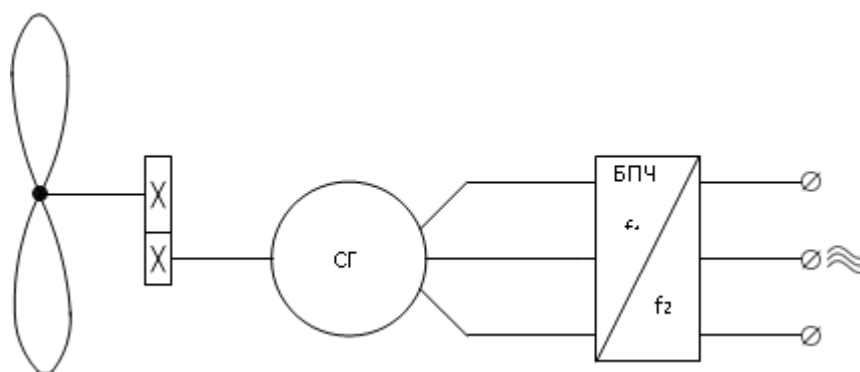


Рисунок 3.8 – Схема підключення синхронного генератора вітроенергетичної установки до мережі із застосуванням безпосереднього перетворювача частоти

Але така система має обмеження в керуванні ВЕУ, зокрема в керуванні її швидкістю обертання і моментом вітроколеса. І, звичайно ж, недоліком є застосування мультиплікатора, що узгоджує частоту обертання вітроколеса із генератором.

Суттєво кращі регульовальні можливості мають ВЕУ із застосуванням СГ і перетворювача частоти, що складається з кількох ланок.

Одним із таких варіантів структури є ВЕУ на основі СГ із використанням додаткових перетворювачів [60, 120–121]. Статор СГ має трифазну обмотку, а на роторі може знаходитися обмотка збудження або постійні магніти. На рис. 6 показана типова структура ВЕУ із СГ з обмоткою збудження. До мережі така установка підключена через силовий перетворювач частоти. Така система дозволяє контролювати коефіцієнт потужності і є ефективною за рахунок використання сучасних перетворювачів частоти із високим ККД.

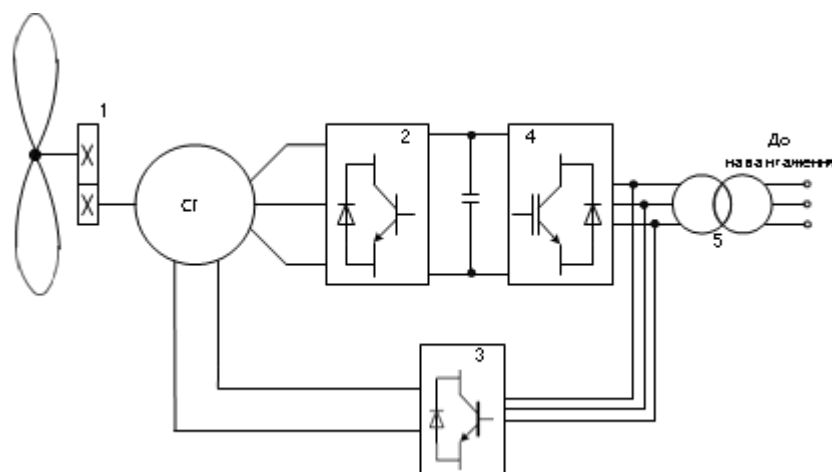


Рисунок 3.9 – Конфігурація вітрової енергетичної установки із використанням синхронного генератора

На рис. 3.9 вітрове колесо підключене до редуктора (варіатора) 1, синхронний генератор СГ приєднаний до мережі через два випрямлячі 2, 3, які працюють на основі широтно-імпульсної модуляції. Випрямляч 2 підключено до обмотки статора, він випрямляє напругу для інвертора 4, що через трансформатор 5 передає напругу у мережу, і може регулювати момент генератора. Випрямляч 3 живить обмотку збудження СГ.

Однак, така система потребує використання редуктора, що знижує ККД системи та СГ, розміри якого можуть бути досить значними, тобто така система є громіздкою.

На рис. 3.10 показано варіант підключення ВЕУ через редуктор 1 до мережі із використанням СГ зі збудженням на постійних магнітах. Перевагою такого варіанта є простота конструкції і відсутність контактних кілець. Обмотка статора генератора підключена до мережі через діодний випрямляч 2, ШІМ-перетворювач 3 та інвертор 4. Діодний випрямляч випрямляє змінну напругу, зняту із статора генератора, ШІМ-перетворювач служить для регулювання потужності від вітроколеса. Інвертор перетворює постійну напругу у змінну і віддає її у мережу.

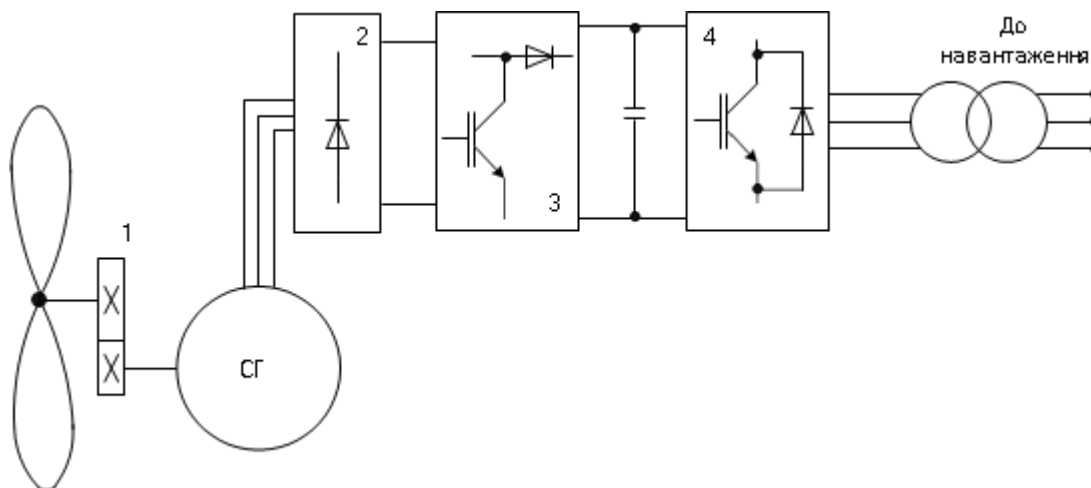


Рисунок 3.10 – Структура системи вітроенергетичної установки із використанням синхронного генератора із збудженням на постійних магнітах

Недоліком цієї системи, як і попередньої є використання редуктора для підвищення частоти обертання вала, що необхідно для СГ. Наявність редуктора спричиняє зменшення ККД ВЕУ. Постійні магніти в синхронному генераторі є дорогими і можуть втрачати магнітні властивості. Сам генератор має значні масогабаритні показники і придатний лише для установок невеликої потужності. Відсутня можливість прямого регулювання вихідної напруги.

В [19, 39–40, 121] приведено аналіз застосування у ВЕУ АГ із подвійним живленням, в якості яких можуть застосовуватися АД з фазним ротором.

Головна перевага АГ з фазним ротором полягає в тому, що напруга на його виході має незмінну частоту при зміні частоти обертання ротора в деяких межах.

Існують два варіанти схем із використанням генератора подвійного живлення – схема асинхронізованого СГ та надсинхронного вентильного каскаду [19, 39, 120].

На рис. 3.11 показано схему асинхронізованого синхронного генератора із використанням в обмотці ротора безпосереднього перетворювача частоти, а обмотка статора напругу підключається до енергетичної системи.

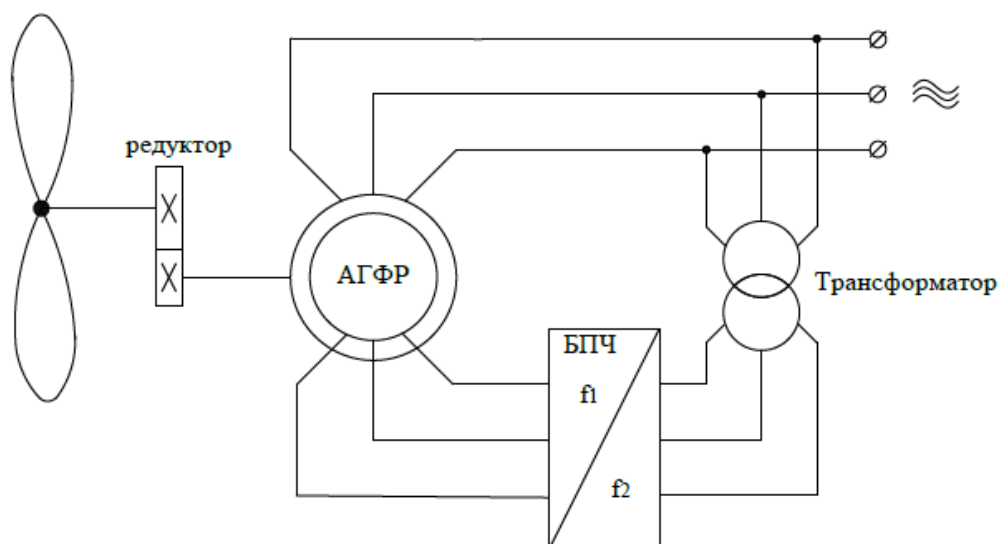


Рисунок 3.11 – Схема вітроенергетичної установки на базі асинхронізованого синхронного генератора із живленням ротора через перетворювач частоти

ВЕУ на основі асинхронізованого СГ може працювати як в надсинхронному, так і в підсинхронному режимах [11]. Для того, щоб отримати економічно визначену потужність, діаметр цих машин має бути достатньо великим, тобто, використання у ВЕУ серійних АД з фазним ротором обмежене. Крім того, серійна асинхронна машина працюватиме в режимах, далеких від номінального, що є небажаним.

На рис. 3.12 показано спрощену схему ВЕУ із використанням надсинхронного вентильного каскаду. Обмотка статора приєднується до енергетичної системи, а обмотка ротора підключена до входу трифазного випрямляча, який з'єднано з інвертором, що ведений мережею [19, 40].

Потужність в такому випадку знімається зі статора і з ротора, що збільшує коефіцієнт використання машини, а також розширює можливості керування.

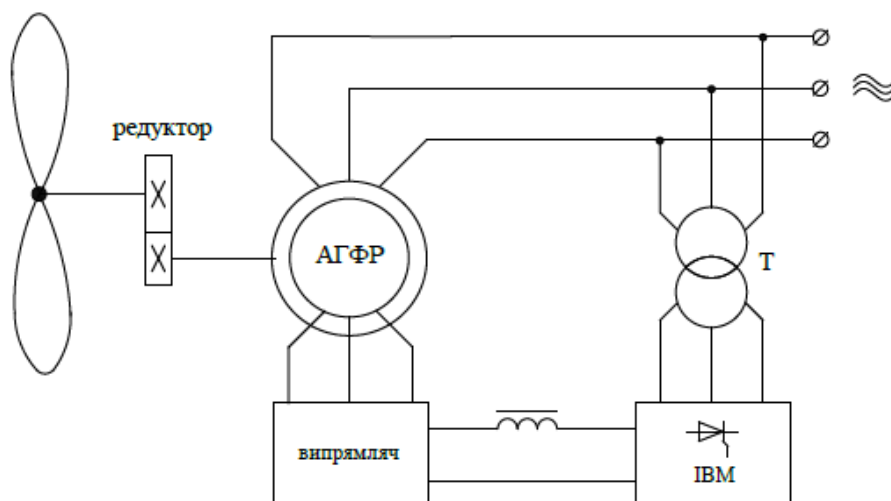


Рисунок 3.12 – Схема вітроенергетичної установки з використанням надсинхронного вентильного каскаду

Недоліком такої системи, крім перерахованих для асинхронізованого СГ, є також те, що генерування активної потужності можливе лише при надсинхронній швидкості обертання, підсинхронний режим неможливий, оскільки випрямляч в колі ротора може пропускати активну потужність лише від роторної обмотки на перетворювач частоти, а не навпаки.

3.3 Розробка структури електромеханічного комплексу вітроенергетичної станції для умов гірничо-збагачувальних комбінатів

В роботах [85–87, 122] була запропонована структурна схема електропостачання ГЗК з використанням ВЕС (рис. 3.13).

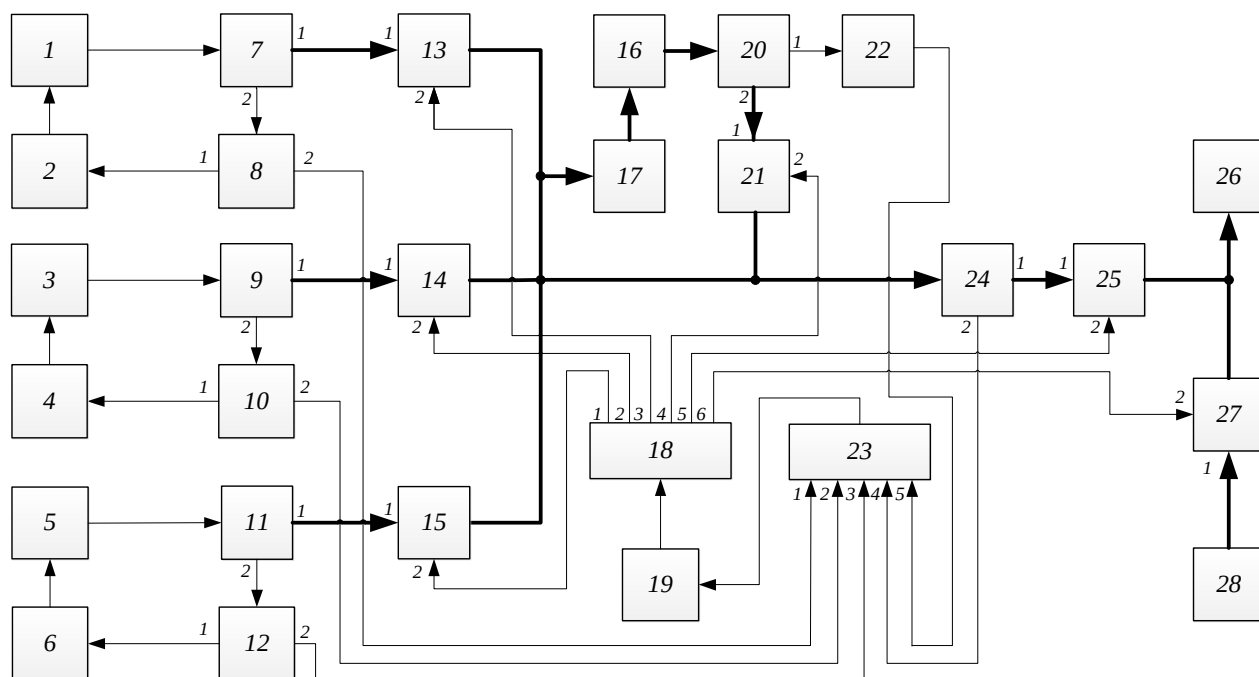


Рисунок 3.13 – Структурна схема локального електротехнічного комплексу електропостачання з використанням вітроенергетичної станції

На рис. 3.13 зображено: 1 – блок системи управління першої вітроенергетичної установки; 2 – перший погоджуючий пристрій; 3 – блок системи управління другої вітроенергетичної установки; 4 – другий погоджуючий пристрій; 5 – блок системи управління третьої вітроенергетичної установки; 6 – третій погоджуючий пристрій; 7 – перша вітроенергетична установка; 8 – перший блок датчиків; 9 – друга вітроенергетична установка; 10 – другий блок датчиків; 11 – третя вітроенергетична установка; 12 – третій блок датчиків; 13 – перший керований роз'єднувач; 14 – другий керований роз'єднувач; 15 – третій керований роз'єднувач; 16 – зарядний пристрій; 17 – випрямляч; 18 – погоджуючий пристрій виводу; 19 – електронно-обчислювальна машина; 20 – акумуляторні батареї; 21 – інвертор; 22 – датчик рівня заряду; 23 – погоджуючий пристрій вводу; 24 – четвертий блок датчиків; 25 – керований роз'єднувач підключення навантаження; 26 – навантаження; 27 – керований роз'єднувач підключення мережі; 28 – мережа.

ВЕС працює наступним чином [122] – блоки вітроенергетичних установок (7, 9, 11) генерують електричну енергію, яка через керовані роз'єднувачі (13, 14, 15) передається на спільну шину. В нормальному режимі роботи, коли параметри генерації знаходяться в нормально допустимих нормах, від спільної шини через керований роз'єднувач 25 відбувається живлення споживачів підприємства 26 спільно з блоком мережі 28. Заряд блоку акумуляторних батарей 20 відбувається від спільної шини через блок випрямляча 17 та блок зарядного пристрою 16. Блоки датчиків, що включають в себе типові датчики струму, напруги, частоти напруги та швидкості вітру (8, 10, 12) через погоджуючі пристрої (2, 4, 6), які призначені для погодження сигналів, передають вихідні параметри блоків (13, 14, 15) в блоки систем управління вітроенергетичними установками (1, 3, 5). Блоки (1,3,5) аналізують ці вихідні параметри та подають сигнал на регулювання роботи блоків (7, 9, 11). Блоки (8, 10, 12) та датчик рівня заряду акумуляторних батарей 22 через погоджуючий пристрій вводу 23 передають сигнал до блоку електронно-обчислювальної машини 19. Якщо вихідні параметри блоків (7, 9, 11) не відповідають гранично-допустимим нормам, тобто аварійний режим, то блок 19 подає управляючий сигнал на комутацію блоків (13, 14, 15). Якщо відбуваються аварійний режим блоку 28, то блок 19 подає управляючий сигнал на комутацію блоку керованого роз'єднувача підключення мережі 27 і живлення блоку 26 відбувається тільки від блоків (7, 9, 11). Причому, якщо відбувається дефіцит генерованої потужності то блок 19 подає управляючий сигнал на блок інвертора 21 та відбувається вирівнювання потужності генерації за рахунок віддачі в локальну мережу накопиченої електроенергії з блоку 20 через блок 21. Після усунення аварійного режиму блоку 28, блок 19 подає управляючий сигнал на блок 27 для підключення блоку 28 до блоку 26, тобто відбувається повернення до нормального режиму роботи.

Таким чином, пристрій електротехнічного комплексу електропостачання підприємств з ВЕУ, шляхом впровадження ВЕС в систему

електропостачання підприємства, забезпечує вищий ступінь безперебійності електропостачання підприємства [13-14, 122].

Блоки датчиків будуть знаходитись в машинному залі ВЕУ, вхідні сигнали від датчиків та управляючі на виконавчі механізми можуть подаватися безпосередньо в диспетчерський пункт. Однак якщо присутня значна територіальна протяжність, то це означає наявність довгих кабельних ліній від кожного пристрою. Таке рішення з техніко-економічних міркувань може виявитися не раціональним з двох причин:

- висока вартість кабельної продукції;
- зростання рівня електромагнітних перешкод з ростом довжини ліній.

Більш раціональним в такій ситуації є використання станцій розподіленої периферії, розташованих в безпосередній близькості до датчиків і виконавчих механізмів [13–14, 85–86, 122].

Так як вітроенергетичний агрегат буде створювати значні перешкоди, то передавати радіо сигнал від датчиків, які будуть знаходитись в машинному залі не доцільно. Правильним рішенням буде під'єднання всіх датчиків до пристрою дистанційної передачі сигналу, який буде розміщений в мачті ВЕУ.

3.4 Форматизація алгоритму функціонування системи керування електротехнічного комплексу вітроенергетичної станції

Вітроенергетична станція може працювати в різних режимах, основним режимом є робота на мережу підприємства, тобто підключення до ГПП [13–14, 19, 85–87]. Локальний режим – це робота ВЕС тільки на споживача, тобто ВЕС є основним і головним джерелом живлення, наприклад, якщо відбуваються якісь неполадки в мережі і вона відключається. Автономний режим – це коли за якихось певних обставин працездатною є тільки одна вітроустановка з усієї ВЕС (рис 3.14).

На основі структурної схеми електротехнічного комплексу електропостачання (рис. 3.13) розроблено алгоритм функціонування системи керування електропостачанням ГЗК від ВЕС (рис. 3.14).

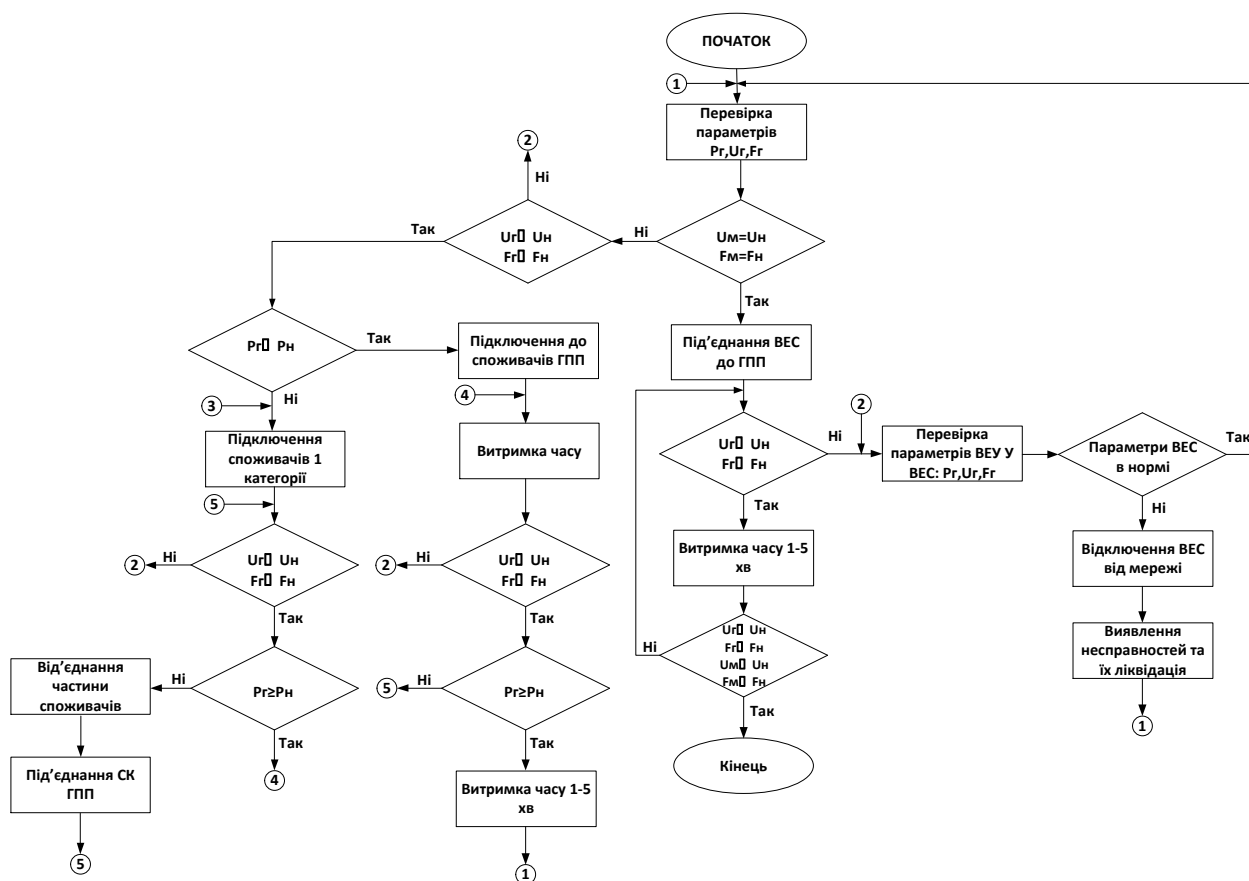


Рисунок 3.14 – Алгоритм функціонування системи керування електропостачанням

Алгоритм функціонування системи керування електропостачанням працює наступним чином: відбувається перевірка параметрів ВЕС (частота, напруга, та потужність), якщо ці параметри знаходяться в нормально допустимих нормах то відбувається підключення ВЕС до ГПП 4/1, після чого знову перевіряються параметри. Далі відбувається витримка часу (1-5 хв), і знову перевіряються параметри, якщо вони в нормі то ВЕС працює на ГПП. Якщо ж параметри на протязі деякого часу не відповідають нормам, то відбувається відключення ВЕС від мережі, виявляються несправності, ліквідуються та знову перевіряються параметри.

Якщо параметри мережі підприємства не відповідають нормам, то відбувається перевірка параметрів та підключення ВЕС до ГПП, ВЕС починає

працювати локально, як тільки параметри мережі нормалізуються то ВЕС знову почне працювати на мережу.

Якщо ж генерована потужність менша ніж потужність навантаження, то відбувається підключення споживачів 1-ї категорії, після чого знову перевіряються параметри, і якщо потужності недостатньо, то відбувається відключення частини споживачів і підключення системи керування ГПП.

В Додатках Г та Д 1 викладені розрахунки з вибору параметрів ВЕС для конкретних умов ГЗК.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Аналіз вітроенергетичного потенціалу типового для України гірничо-збагачувального комбінату з визначенням середніх значень швидкості вітру в місці потенційного розташування вітроенергетичної установки підприємства, показав, що середньорічна швидкість вітру складає близько 4,1 м/с. Враховуючи той факт, що, як раніше було зазначено можливість встановлення вітроенергетичних установок на відвалах та шламосховищах гірничо-збагачувального комбінату дає значний приріст швидкості вітру, то реальна швидкість вітру на східному відвалі складає 6,848 м/с, а на західному 7,065 м/с, що є достатнім для ефективного використання вітроенергетичної станції як локального об'єкту генерації електроенергії у синергетичному варіанті в складі системи електропостачання гірничо-збагачувального комбінату.

2. На основі відомих варіантів структур вітроенергетичних комплексів, модернізовано та отримано варіант розбудови енергоефективного електроенергетичного комплексу для живлення топографічно віддалених електроенергоспоживачів – відвалів пустих порід та технологічних шламосховищ гірничозбагачувальних фабрик типових гірничозбагачувальних комбінатів.

3. На основі структурної схеми розроблено алгоритм функціонування системи керування електропостачанням, згідно якого передбачається робота

вітроенергетичної станції в трьох режимах: автономному, локальному і на розподільчу електромережу підприємства. Зформатизований алгоритм роботи системи керування вітроенергетичної станції враховує всі можливі проблеми роботи системи керування: занижка або завищена генерована напруга, занижка або завищена частота напруги, що є достатнім для стабільності функціонування вітроенергетичної станції.

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

4.1 Обґрунтування вибору асинхронного генератора для електротехнічних комплексів вітроелектростанції

Як зазначено в розділі 3 даного дослідження, одним з варіантів структур енергоорієнтованих електромеханічних комплексів, які використовуються на ВЕУ, є використання АГ з ємнісним збудженням [59, 123]. Як відомо, АГ як електрична машина повністю аналогічний асинхронному двигуну з короткозамкненим ротором. Отже, до вказаної електричної машини можна віднести усі ці ж переваги використання перед електричними машинами інших конструкцій, тобто, саме головне – порівняно низьку вартість виготовлення з найвищою надійністю експлуатації, що пов'язано з відсутністю ковзних струмозмінальних контактів [39–40, 60, 124–125].

Остання обставина є надто важливою при урахуванні того факту, що капсула вітрогенератору з електричним генератором зазвичай знаходиться на значній висоті, тому обслуговуючому персоналу доступ до капсули для проведення регламентних робіт ускладнено.

Найбільш слабкими ланками в електромеханічній системі ВЕС залишаються підшипникові вузли вентилятору та електричної машини, та система керування кутом повороту лопатей. Враховуючи, що швидкість обертання ротору АГ постійно висока та значно вище швидкості обертання лопатей (які ще при постійному вітрі можуть бути нерухомими), то стає зрозумілим, що природне зношування підшипникових вузлів при зміні кутів лопатей менше, ніж у підшипникових вузлах АГ, то як варіант, останню частину електромеханічної системи можливо розмістити окремо від капсули, у тому числі у місцях, максимально наближених до земної поверхні. Таким чином, у першому наближенні надійність (та довготривалість) роботи ВЕС

визначається підшипниковими вузлами обертових частин, при правильно проєктованій електротехнічній частини системи. Контактори та інші перемикаємі елементи для підтримки надійності системи також використовувати виключно безконтактні.

4.2 Розробка структури та моделі одиночної вітроенергетичної установки з асинхронним генератором з ємнісним збудженням

Виходячи з аналізу попереднього розділу, основні проблеми в процесі функціонування електромеханічних комплексів ВЕУ виникають не в випадку, коли такий АГ працює разом зі зовнішньою системою електропостачання, а у випадку, коли він працює в автономній системі електропостачання [125–127]. Як відомо, при роботі таких генераторів частота та амплітуда живлячої напруги повинні не виходити за припустимі межі [128]. Нижче на рис. 4.1 наведена функціональна схема подібної ВЕС [123]:

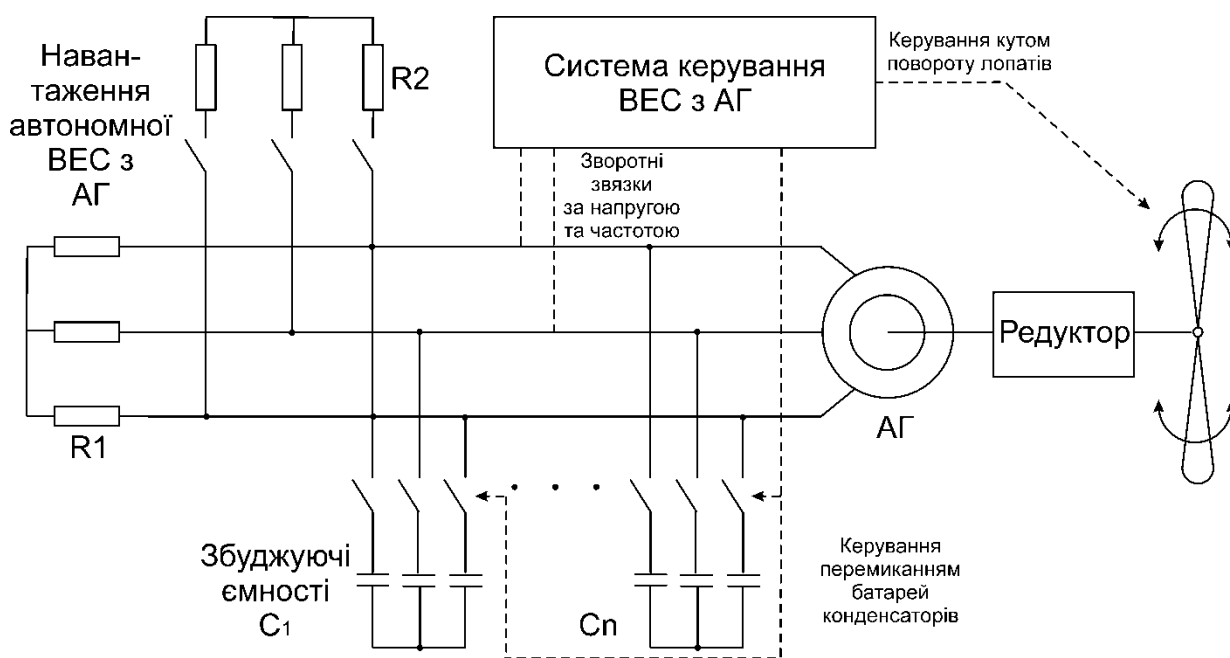


Рисунок 4.1 – Функціональна схема автономної вітроенергетичної установки з асинхронним генератором

Для дослідження поведінки таких систем в автономному варіанті була розроблена модель ВЕМ з супутнім обладнанням (рис. 4.2), та отримані

графіки швидкості (частоти) та вихідної напруги АГ при різних умовах експлуатації.

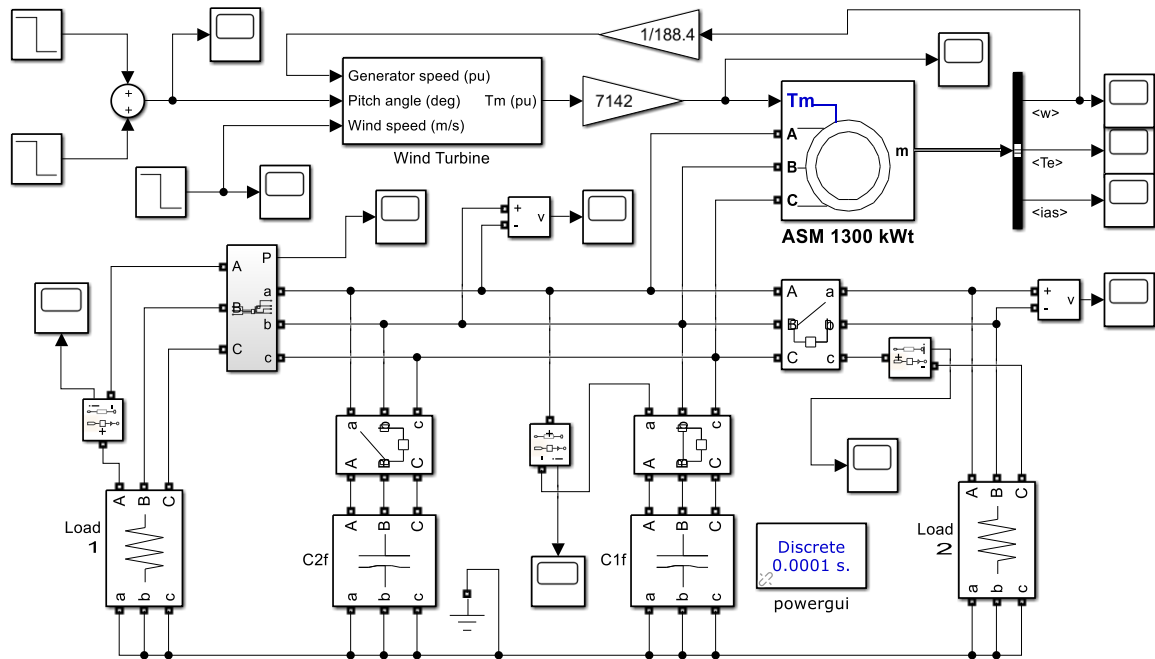


Рисунок 4.2 – Структура моделі вітроенергетичної станції у складі вітроенергетичних установок з асинхронними генераторами з ємнісним збудженням

В структурі, що пропонується, використовується асинхронна машина з номінальною потужністю 1300 кВт при номінальній напрузі статора 4160 В, 50 Гц, взята з бібліотеки Матлаб. Вітрогенератор Wind Turbine також взятий з бібліотеки Матлаб, з параметрами: номінальна вихідна механічна потужність – 1.5 МВт, базова швидкість вітру – 12 м/с. Характеристика турбіни приведена до кута повернення лопаті 0 градусів наведена на рис. 4.3:

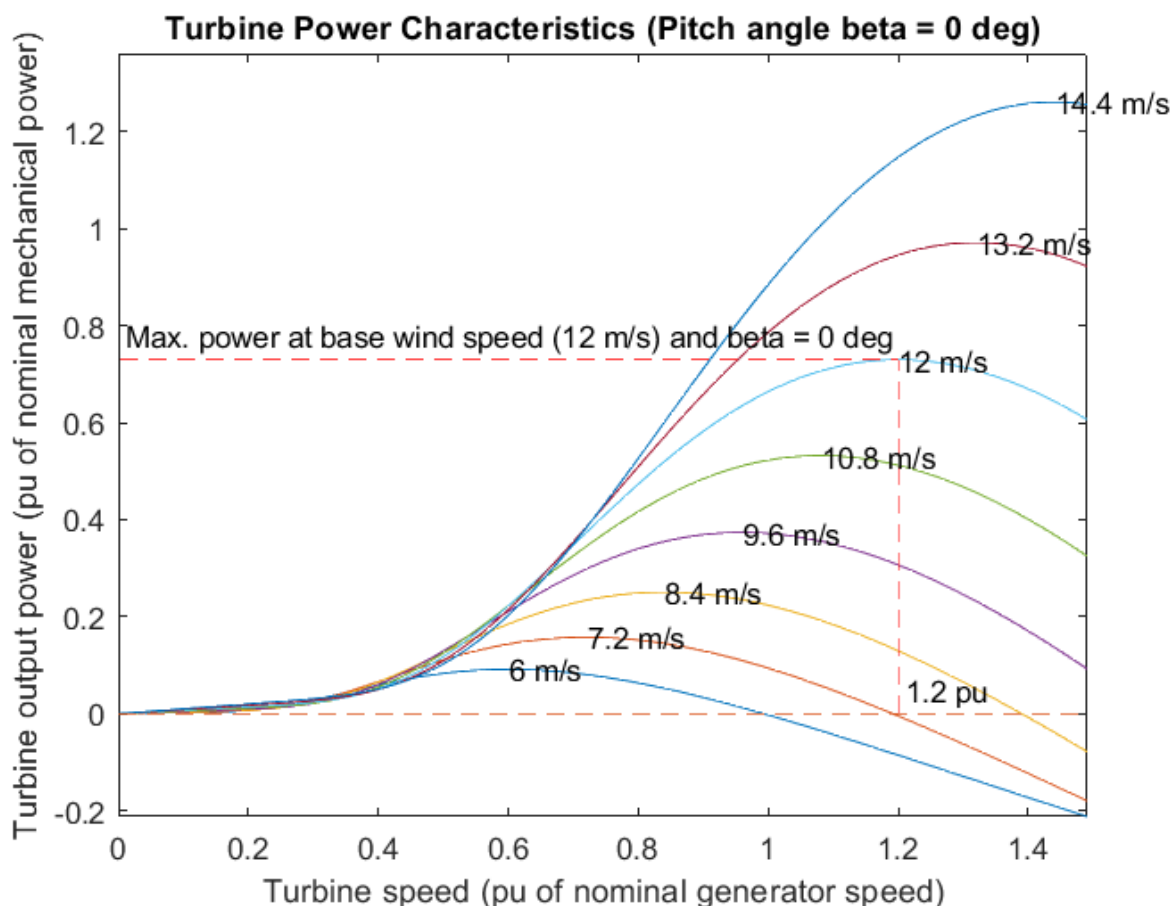


Рисунок 4.3 – Характеристики турбіни при різних швидкостях вітру та куту лопатей 0 град

4.2.1 Дослідження динаміки одиночної вітроенергетичної установки з асинхронним генератором з ємнісним збудженням в автономному режимі

За допомогою розробленої моделі на рис. 4.2 в автономному варіанті змодельовано перехідні процеси в БЕУ при ступінчастому зниженні швидкості вітру та ступінчастому накиду активного навантаження [123]. За допомогою моделювання оцінимо, яким чином можна усунути наслідки вказаних збурюючих впливів. На рис. 4.4 показані отримані процеси збурення режиму генерації АГ та процеси відновлення номінального режиму його генерації. Номінальними величинами процесу генерації АГ прийняті лінійна напруга 2000 В та швидкість обертання генератору (188.4 об/хв, або 50 Гц).

Аналіз графіків показує наступне. При зменшенні швидкості вітра на 10-й секунді (від 15 до 10 м/с) зменшуються частота (від 190 до 145 об/хв) і напруга генератору (від 2000 до 100 вольт). Повернути їх до колишніх значень (190 об/хв та 2000 В) можна шляхом зменшення кута повороту лопатей на 20-й секунді (від 25 до 12 градусів).

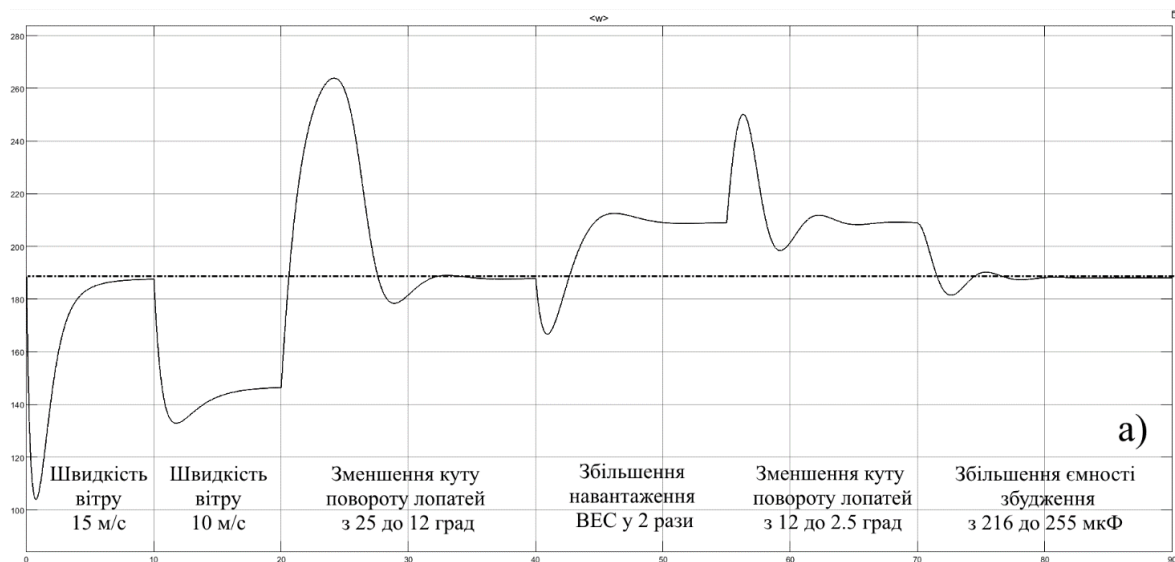


Рисунок 4.4 – Графік швидкості асинхронного генератора при різних умовах

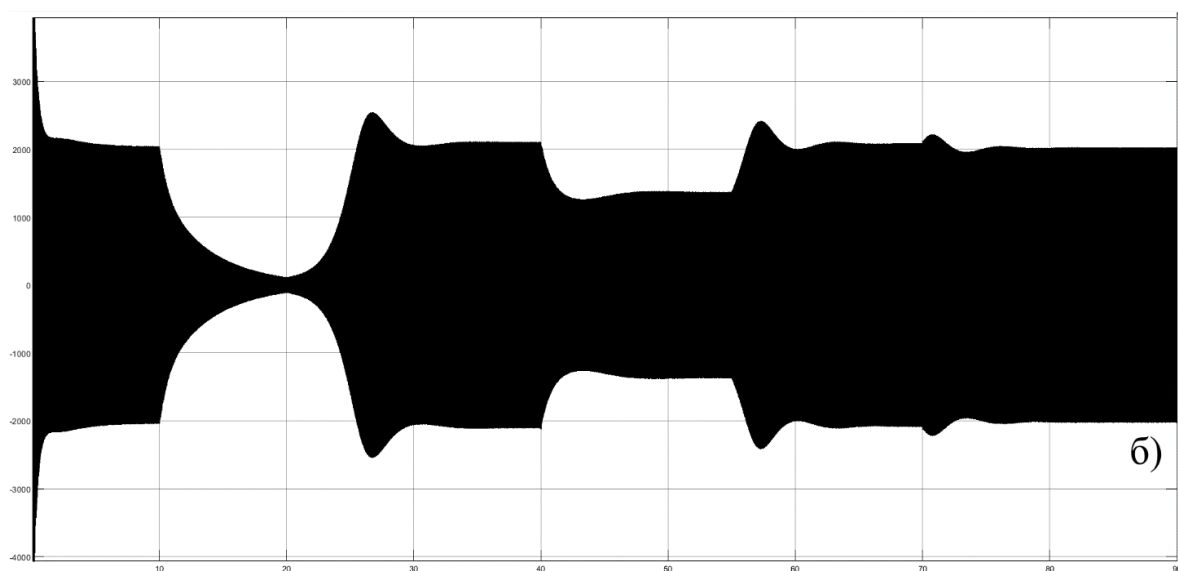


Рисунок 4.5 – Графік напруги асинхронного генератора

Збільшення навантаження ВЕС на 40-й секунді у 2 рази приводить к збільшенню швидкості АГ до 210 об/хв (+11,7 % від номінального значення)

та зменшенню напруги АГ до 1300 В (-35 % від номінального значення). Спроба відновити попередній режим через подальше зменшення кута повороту на 9,5 градусів на 55-й секунді приводить до повернення напруги до колишнього значення, але швидкість АГ залишається неприпустимо високою – практично на тому ж рівні (210 об/хв). Щоб знизити швидкість до колишнього значення, необхідно збільшити на 70-й секунді ємність збудження АГ, додатково підключивши батарею конденсаторів. Напруга на АГ практично залишається на цьому ж рівні (2000 В).

Таким чином, визначено чотири канали, які системоутворюючи впливають на режими роботи ВЕС з АГ з ємнісним збудженням [59, 123]:

- зміна швидкості вітру;
- зміна куту повороту лопатей;
- зміна величини навантаження ВЕУ;
- зміна величини ємності самозбудження АГ.

По першому та третьому каналам вплив на режими ВЕУ йде випадковим чином, а наслідки цього впливу можна ліквідувати за допомогою керування по каналам, що залишилися - другому та четвертому.

Таким чином, в загальному плані маємо систему, в якій є два доступних канали керування та два випадкових каналів впливів. Останні збурюють алгоритми керування до рівня, на якому потрібно розробити систему керування, яка здатна автоматично підтримувати частоту та напругу АГ на належному рівні. Природно, що вказана система також повинна мати два контури зворотних зв'язків – за напругою та швидкістю АГ [19, 39, 123].

Досліджуючи на моделі регульовальні можливості системи, встановлено, що цілком можливо за допомогою простих засобів досягнути достатньої якості підтримки величин швидкості ротору (частоти) та амплітуди напруги на статорі АГ. Так, якщо плавно протягом 10 сек. зменшувати швидкість вітру, то цей варіант показано на рис. 4.6:

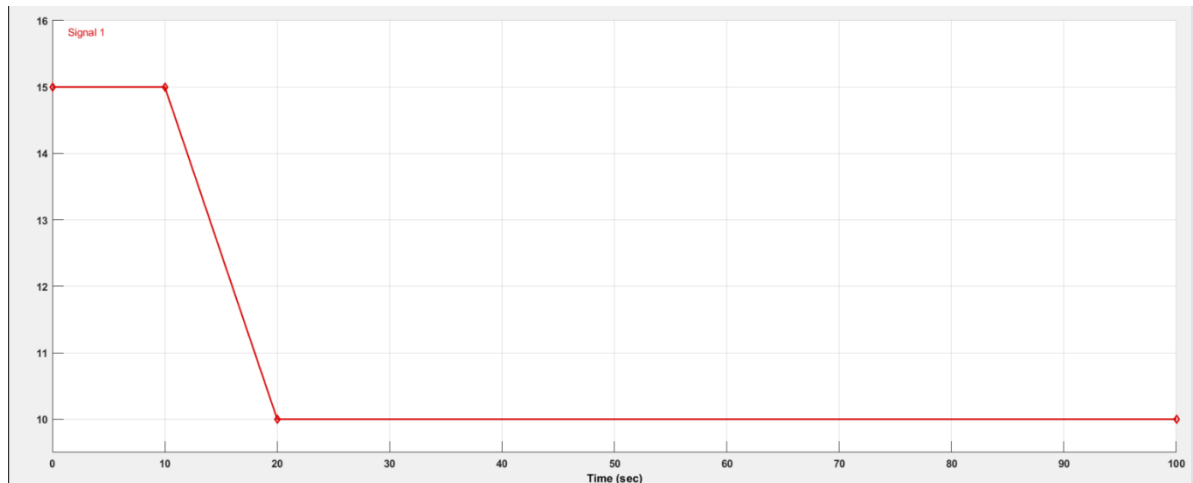


Рисунок 4.6 – Графік зміни швидкості вітру

Якщо водночас аналогічним чином зменшувати кут повороту лопатів від 25 до 12 градусів, то отримаємо перехідні процеси за швидкістю ротору та напругою статора АГ (рис. 4.7 та 4.8):

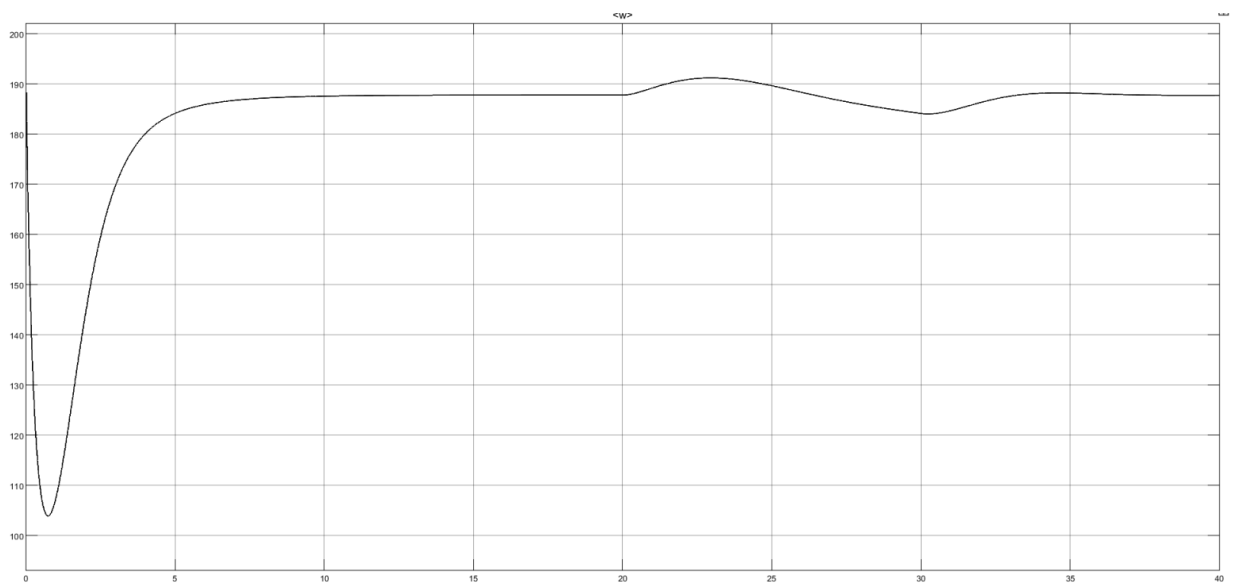


Рисунок 4.7 – Графік швидкості ротору асинхронного генератора

Тут перші 5 секунд перехідного процесу відповідають перехідному процесу втягування АГ з довільними початковими умовами в сталий режим, тому ця ділянка графіку до предмету дослідження вказаний статті не має прямого відношення. Маємо, що з 20-й по 35-ю секунди АГ починає реагувати на спільну дію зміни вітру та куту обертання лопатів (коливання йдуть від 184

до 192 рад/с при сталої швидкості 188 рад/с). В процентах відхилення частоти не буде перевищувати 2,17 % [123]. На рис. 4.8 показана напруга на статорі АГ:

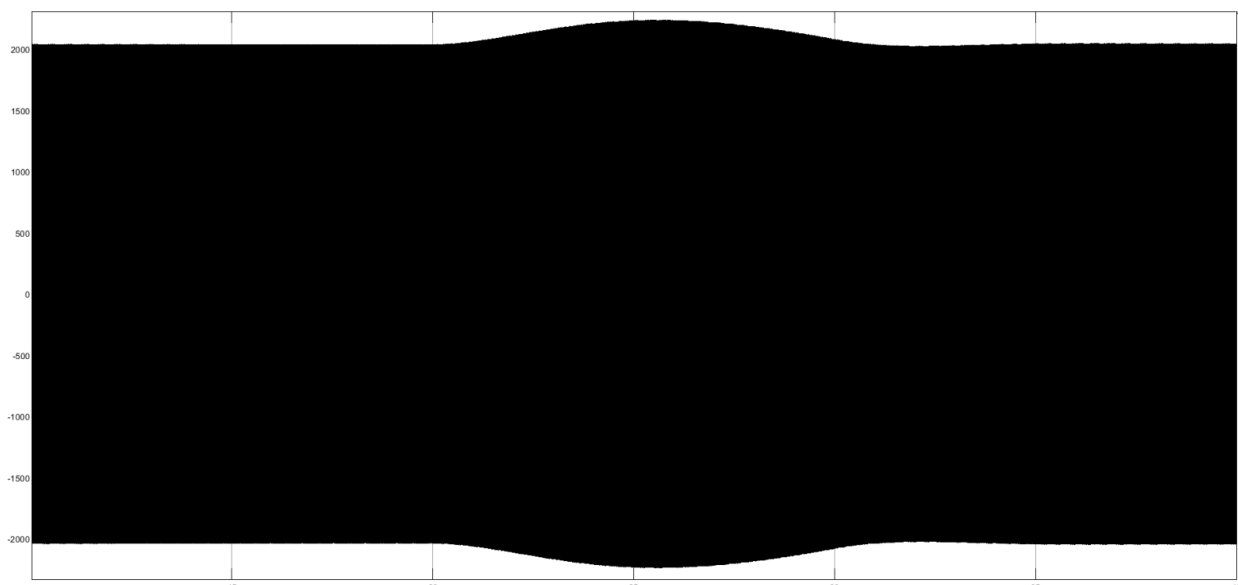


Рисунок 4.8 – Графік напруги статору асинхронного генератора

Як свідчить з рис. 4.8 амплітуда вихідної напруги генератора на 25-й секунді на 11.2% перевищує номінальну вихідну напругу АГ. В порівнянні з рис. 4.4 (перші 40 секунд) видно значний позитив. Однак, обидва ці показники виходять за гранично припустимі межі згідно стандартам на якість напруги для мереж загального користування, але можуть відповідати вимогам якості електроенергії для локальних мереж (перехідне відхилення напруги при накиду-скиданні симетричного навантаження не більш $\pm 20\%$, перехідне відхилення частоти при накиду-скиданні симетричного навантаження не більш $\pm 7.5\%$) [129–130]. З аналізу логічним виглядає необхідність того, що система керування поворотом лопатей повинна бути суттєво нелінійної, щоб втримати частоту та напругу АГ в потрібних межах (0,8% за частотою та 10% за амплітудою).

При цьому, якщо на 40-й секунді, коли буде в два рази збільшено активне навантаження, одночасно повернути лопаті на кут 9.5 градусів, а

також збільшити ємність збудження АГ з 216 мкФ до 255 мкФ, то отримаємо перехідний процес за швидкістю виду рис. 4.9.

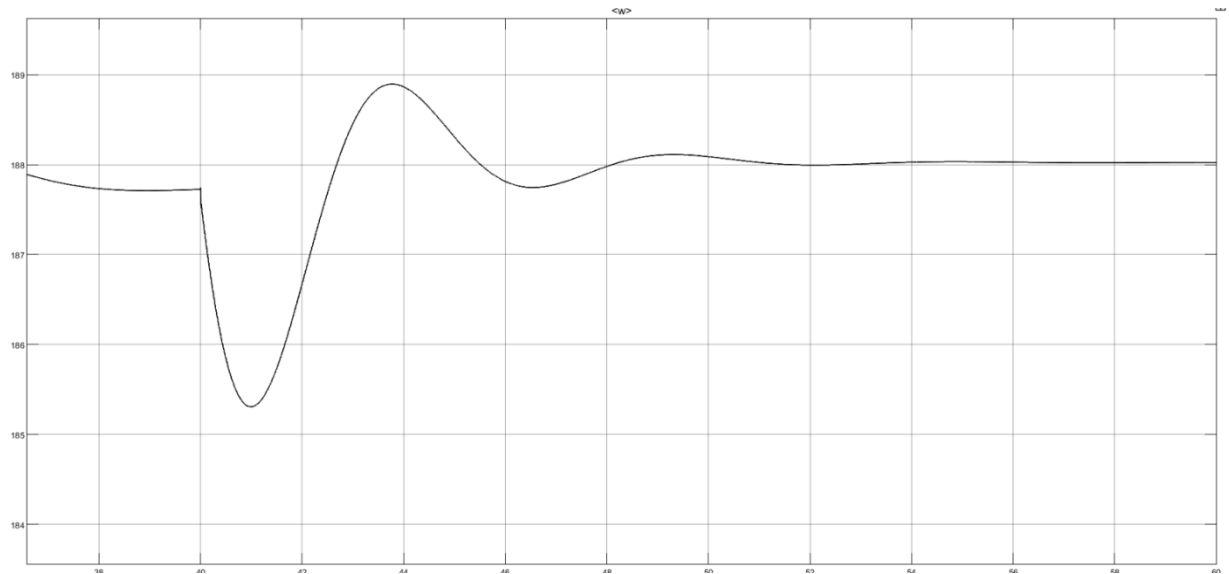


Рисунок 4.9 – Перехідний процес швидкості при накиду навантаження та одночасних ступінчастих корегувальних впливах

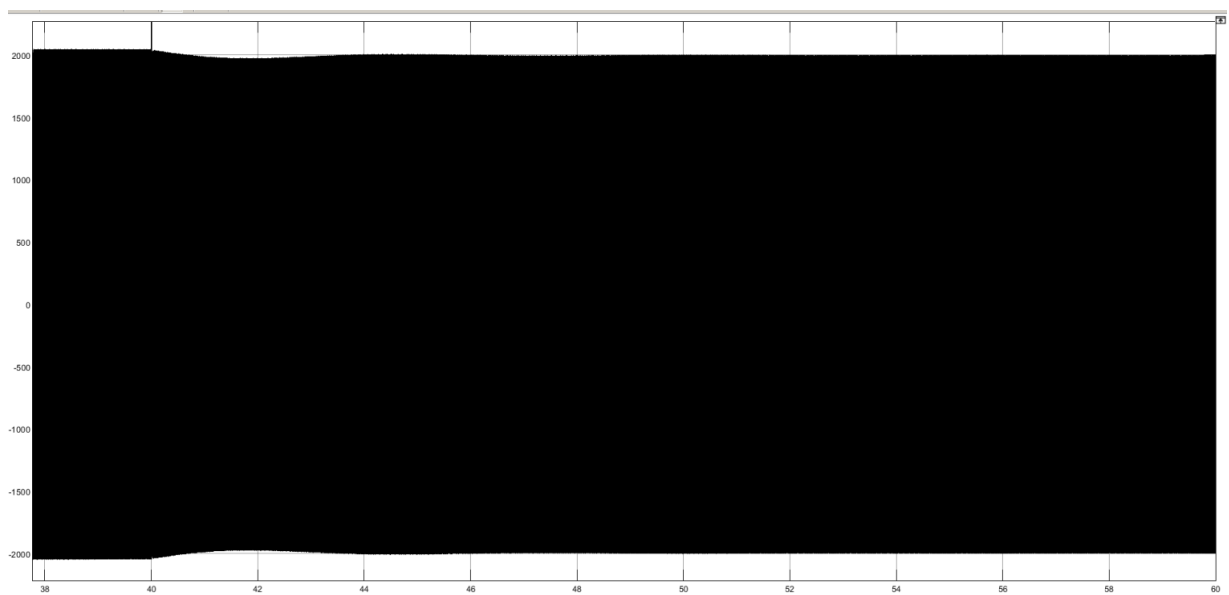


Рисунок 4.10 – Графік напруги асинхронного генератора при накиду навантаження та одночасних ступінчастих корегувальних впливах

З даного рисунку свідчить, що, що максимальне відхилення за швидкістю рівняється 1.6 %, а зниження напруги – на 2.3%. Тобто структура ВЕУ з АГ за якістю енергії відповідає стандарту на локальні мережі з

автономними електростанціями, а на стаціонарні мережі загального використання – ні [123].

4.2.2 Дослідження динаміки одиночної вітроенергетичної установки з асинхронним генератором з ємнісним збудженням разом з енергосистемою

В даном розділі приведемо дослідження роботи одиночного асинхронного вітрогенератору у складі енергосистеми, тобто з приєднанням автономної ВЕУ (рис. 4.2) до енергосистеми рис. 4.11.

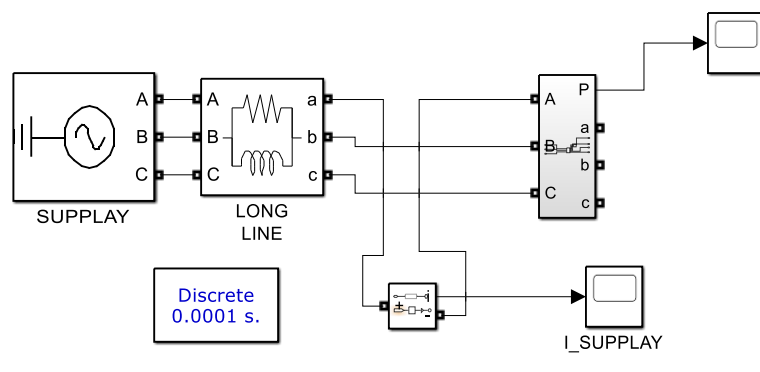


Рисунок 4.11 – Фрагмент енергосистеми до приєднання до моделі рис. 4.2.

Початкові умови для дослідження динаміки такі ж самі, що й при побудуванні графіків рис. 4.7-4.10. Як результат моделювання – графіки перехідних процесів (при інших рівних умовах), при сумісній роботі з енергосистемою (рис. 4.12-4.13)

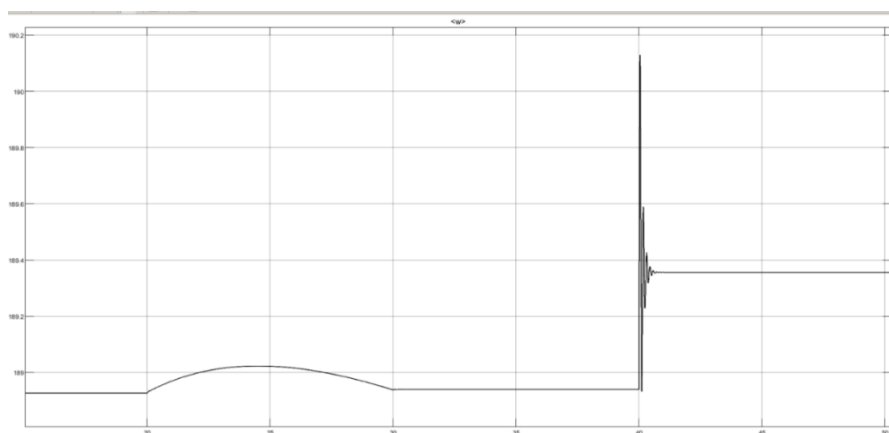


Рисунок 4.12 – Графік швидкості асинхронного генератора при сумісній роботі з енергосистемою

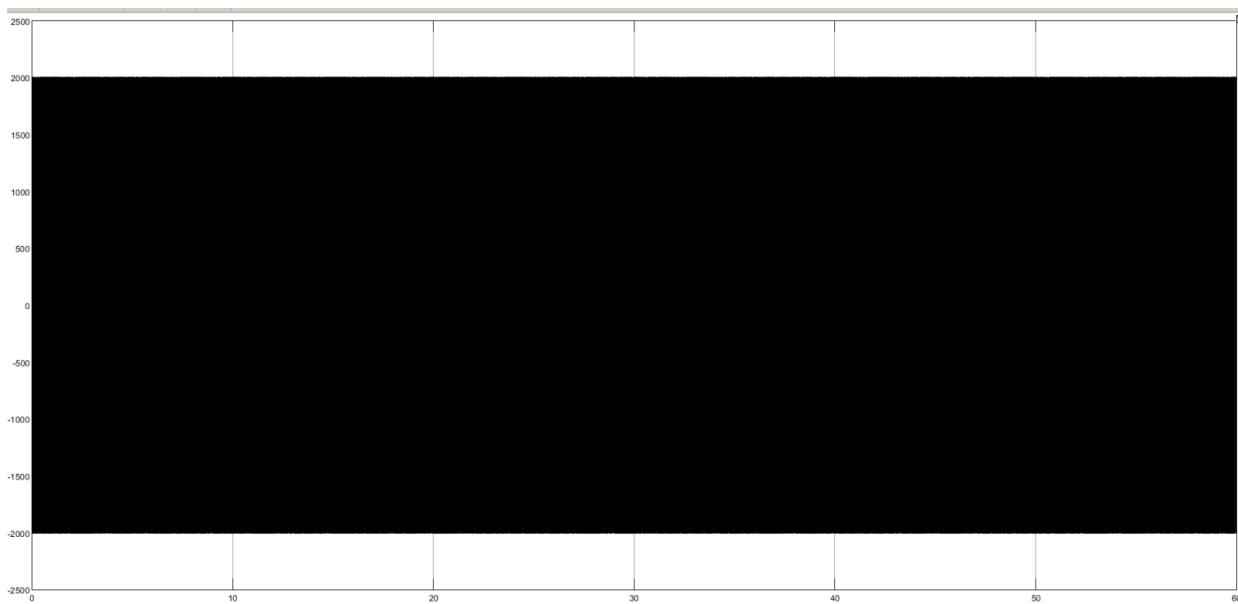


Рисунок 4.13 – Графік напруги асинхронного генератора при сумісній роботі з енергосистемою

Як свідчать ці графіки, з 20 до 30 секунди (коли стихає вітер та одночасно коригується кут повороту лопатів), напруга АГ практично не змінюється, швидкість АГ короткочасно та плавно відхиляється уверх на 0,05%, на 40-й секунді (при накиду навантаження та одночасних корегуючих впливах) швидкість АГ більш різко відхиляється на 0,57% та повертається до трохи вищого (на 0,24%) значення.

На рис. 4.14 наведені графіки активної потужності АГ та енергосистеми. Видно, що режими роботи енергосистеми та АГ добре збалансовані, тому що практично уся активна потужність з АГ витрачається на місцеве навантаження, перетокі потужності з енергосистемою відсутні. В енергосистемі здійснюється короткочасний відбір активної потужності з піком до -50 кВт та сталим значенням -7-8 кВт, після чого, на 40-й секунді (при збільшенні навантаження удвічі), здійснюється короткочасний накид активної потужності до 200 кВт, після чого перетоків потужності не спостерігається.

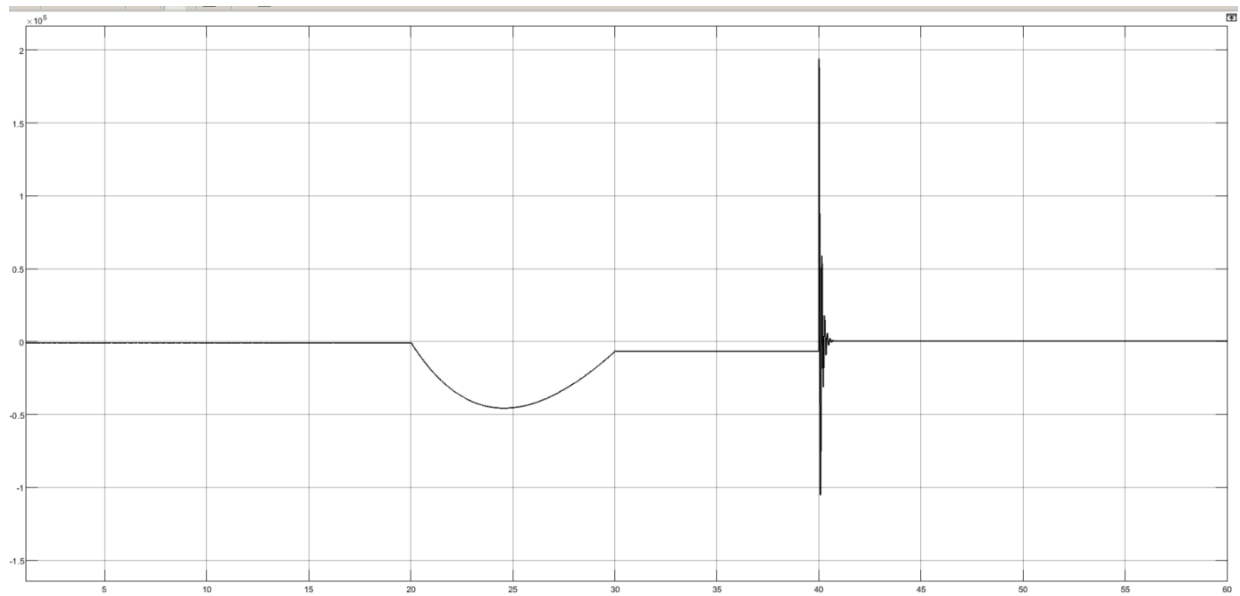


Рисунок 4.14 – Графік потужності енергосистеми

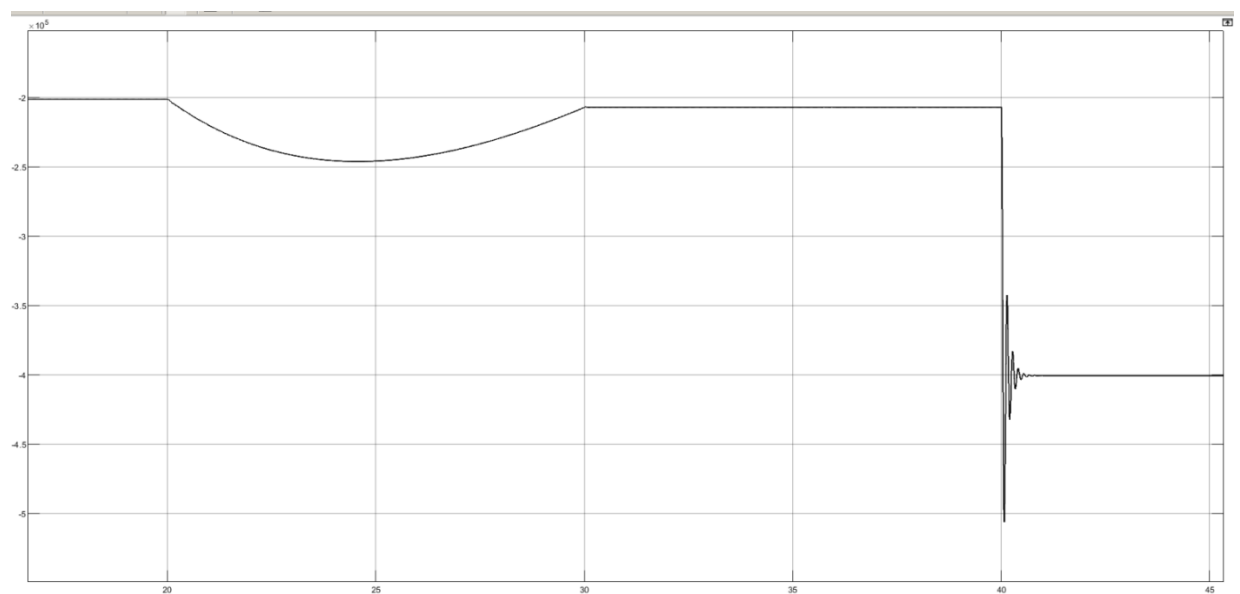


Рисунок 4.15 – Графік потужності асинхронного генератора при сумісній роботі з енергосистемою

З рис.4.15 можна спостерігати, що АГ повністю забезпечує активною енергією споживачів, без участі в цьому прочей енергосистеми, виключення – коли від АГ йде короточасний незначний перетік потужності піком 50 кВт на протязі 20-30 сек.

4.3 Аналіз процесу функціонування електромеханічних систем вітроенергетичних установок із включенням у їх структуру конденсаторних батарей

Водночас як свідчать дослідження [59, 123], важливим елементом впливу на процес функціонування електромеханічного комплексу ВЕУ на базі АГ є конденсаторні батареї, котрі входять до структури цього комплексу. Розглянемо вплив конденсаторних батарей на схеми паралельної роботи з енергосистемою. Якщо їх усунути зі схеми, то ми бачимо, процеси в АГ практично не відрізнити для випадку з ємнісними збуджуючими конденсаторами. Це природно, тому що включений в енергосистему АГ тепер працює як звичайна машина змінного струму, ротор якої працює на надсинхронній швидкості, забезпечуючі генераторний режим.

Незважаючи на то, що асинхронна машина, яка підключена до енергосистеми, більш не потребує збудження від конденсаторів (збудження може тепер забезпечити енергосистема). Але, якщо графіки напруги та швидкості АГ, активних потужностей енергосистеми та АГ практично не зміняться від факту усунення конденсаторних батарей, то реактивні потужності АГ та енергосистеми зміняться наступним чином, як це показано на рис. 4.16.

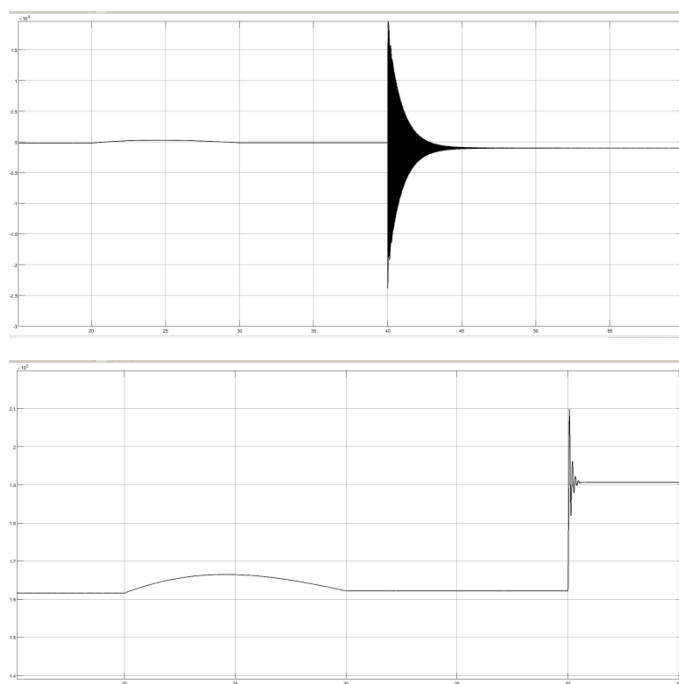


Рисунок 4.16 – Графік реактивної потужності енергосистеми та асинхронного генератору при сумісній роботі з енергосистемою (з конденсаторами – зліва, без конденсаторів – справа)

Аналізуючи рис. 4.16, зрозуміло, що з конденсаторами, налаштованими на збудження автономного АГ, енергосистема практично не споживає реактивної потужності, а без них споживає від 160 до 190 кВар. Звідси витікає наступний висновок: АГ ВЕУ повинен бути завжди зашунтований конденсаторами самозбудження, щоб в автономному режимі (якщо в енергосистемі трапиться аварія, та вона від'єднається від підсистеми з АГ) підтримувати прийнятні параметри якості електричної енергії, а в режимі сумісної роботи з енергосистемою запобігти перетокам реактивної потужності, які змушують збільшити перетин проводів системи розподілу електричної енергії.

З результатів моделювання також витікає, що розрахункові значення конденсаторів збудження повністю співпадають з розрахунковими значеннями конденсаторів компенсації реактивної потужності. Це природно

тому, що обидва розрахункових методи витікають з фізичних процесів, що пов'язані зі намагніченням обмотки статора асинхронної машини.

4.4 Дослідження режимів одиночної вітроенергетичної установки при короткочасних коротких замиканнях із системою зовнішнього електропостачання та без неї

«Автономна» робота одиночної ВЕУ. Одним з вагомих показників ефективності функціонування систем електропостачання є їх реакція на к.з. стосовно віддалених споживачів ЕЕ, якими є аналізуємі види, то тут проблема набирає ще більших значень, оскільки, як зазначалося у першому розділі даної роботи, ЛЕП до цих приймачів будуються у тимчасовому варіанті [6, 9–10, 14]. Такі конструкції ЛЕП схильні до міжфазових к.з. При цьому у більшості своєї ці к.з. є «прохідними», тобто є короткочасними і не виводять з ладу обладнання, але можуть перейти у розряд «непрохідних» з відповідними наслідками. Іншим моментом специфіки є те, що споживачі можуть функціонувати в варіанті синергетичної СЕП, можуть отримувати живлення як від ВЕУ, так і від централізованого джерела. Проаналізуємо шляхом моделювання обидва ці режиму.

Нижче наведені результати дослідження к. з. ($\approx 0,1$ с.) без врахування зовнішньої системи електропостачання (рис. 4.17–4.20):

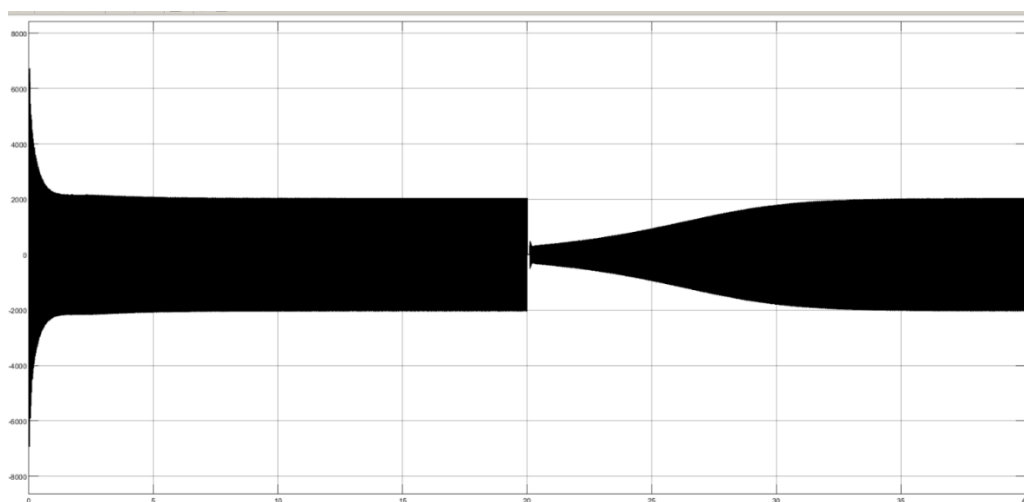


Рисунок 4.17 – Напруга статора асинхронного генератора після короткочасного короткого замикання

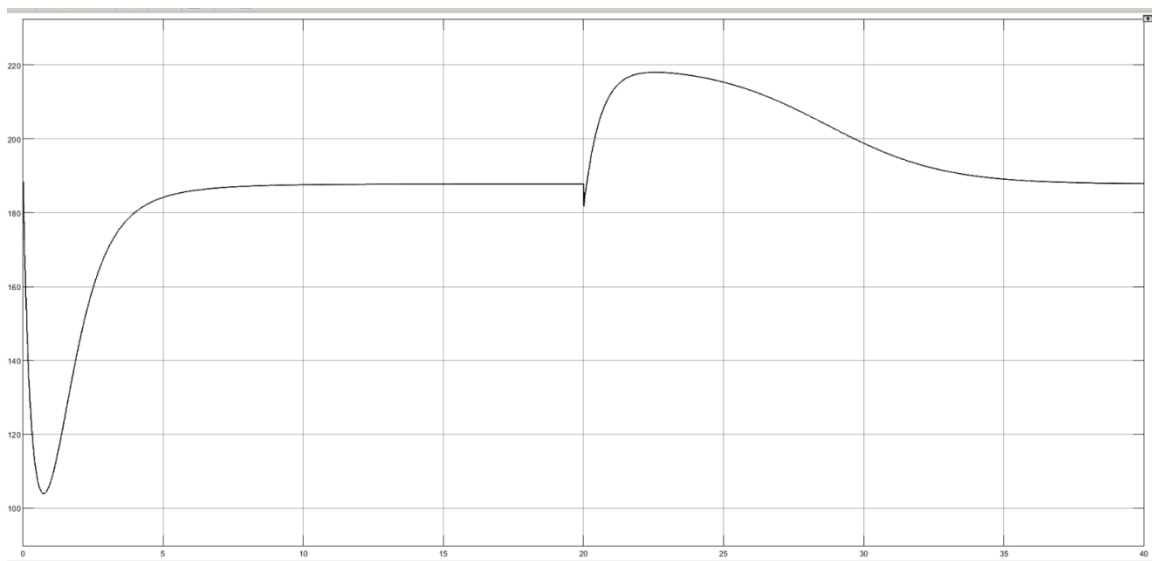


Рисунок 4.18 – Швидкість ротору (частота мережі) асинхронного генератора вітроенергетичної установки

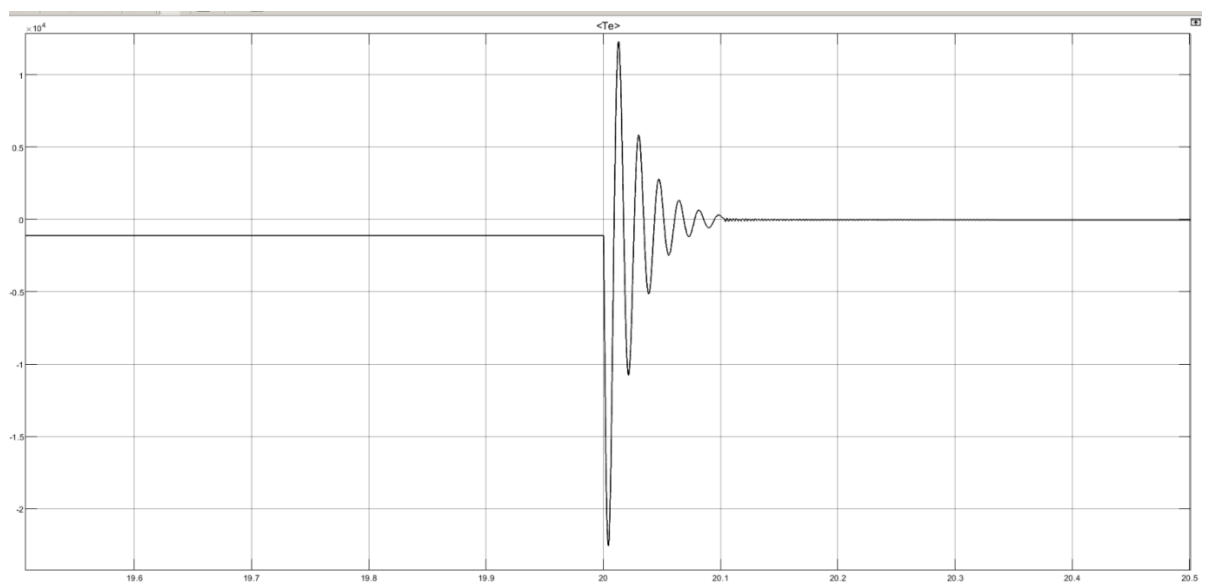


Рисунок 4.19 – Графік електромагнітного моменту асинхронного генератора вітроенергетичної установки при короткочасному замиканні

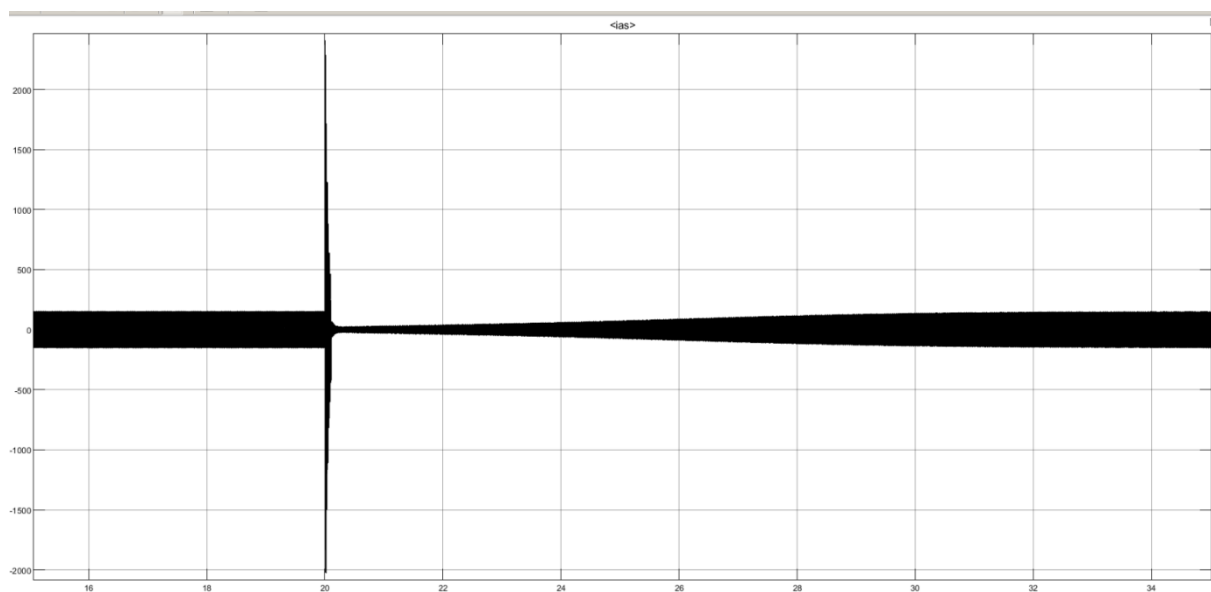


Рисунок 4.20 – Графік струму асинхронного генератора вітроенергетичної установки при короткочасному замиканні

З рис. 4.17-4.20 видно, що в автономній системі електропостачання після проходних к.з. нормальний режим роботи системи відновляється повільно – десятки секунд. При цьому частота напруги живлячої мережі відхиляється на 16% у більшу сторону, а її рівень спадає до 20% від номінального значення. Особливу увагу треба звернути на графік струму АГ (рис. 4.20) – амплітуда більш ніж у 10 разів перевищує номінальне значення струму. Це є негативом. Взагалі, як бачимо, «прохідне» к.з. для «автономних» ВЕУ, які не мають виходу на зовнішню систему електропостачання, є дуже несприятливим режимом, й треба передбачати усілякі заходи для запобігання будь-яких к.з. в системі. Самий надійний спосіб запобігання негативних наслідків від к.з. – якомога швидке відєднання ділянки з к.з. від АГ.

Паралельна робота одиночної ВЕУ разом з системою електропостачання. Нижче наведені графіки дослідження впливу к.з. на ВЕУ разом з зовнішньою системою електропостачання (рис. 4.21-4.24) [123].

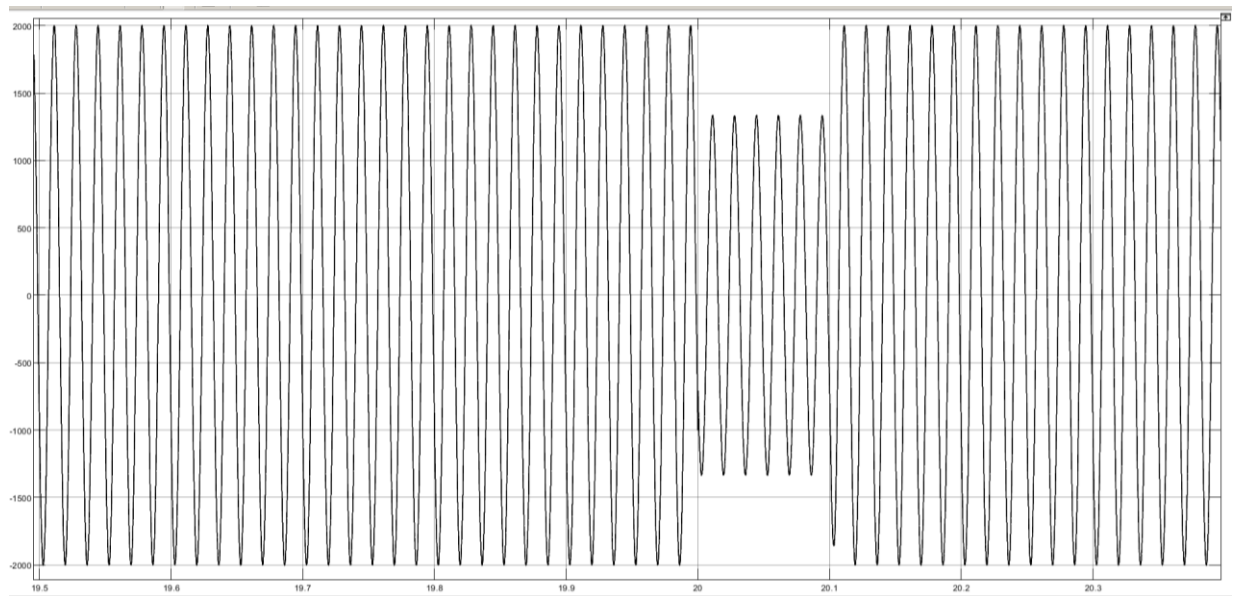


Рисунок 4.21 – Графік напруги при короткочасному короткому замиканні

Як видно, прохідні КЗ набагато легше проходять в випадку паралельної роботи ВЕУ з енергосистемою – напруга в точці к.з. спадає з 2000 В до 1300 В (в автономному режимі – практично до 0), відхилення частоти обертання (частоти мережі) – - приблизно 1 % (рис. 4.22) проти 16% (рис. 4.18) в автономному варіанті функціонування.

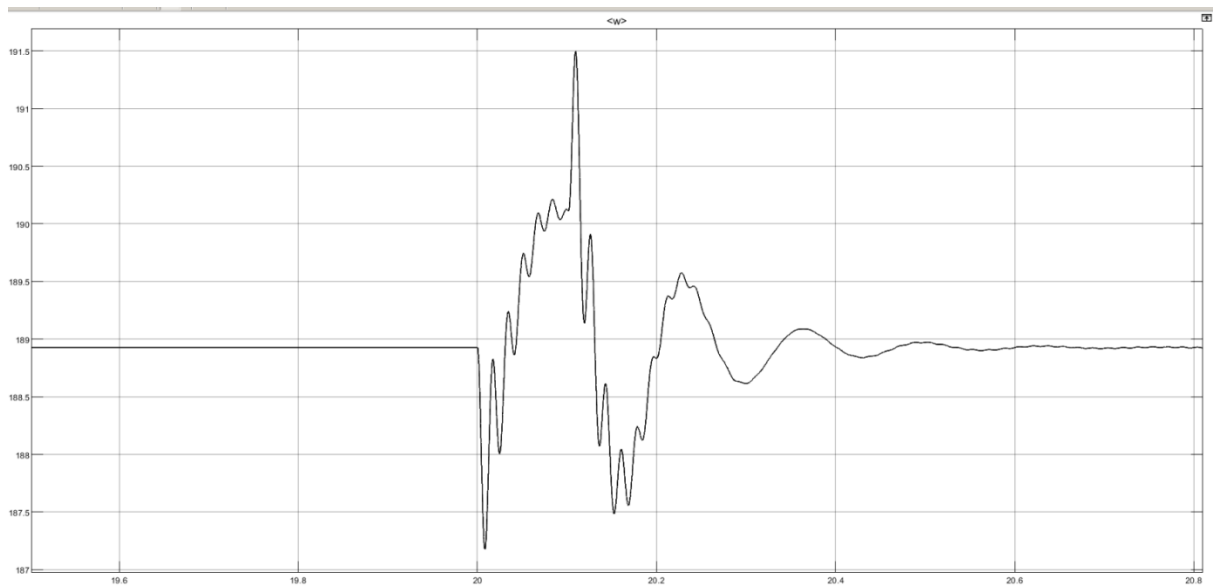


Рисунок 4.22 – Графік швидкості ротору (частоти мережі в масштабі) при короткочасних коротких замиканнях

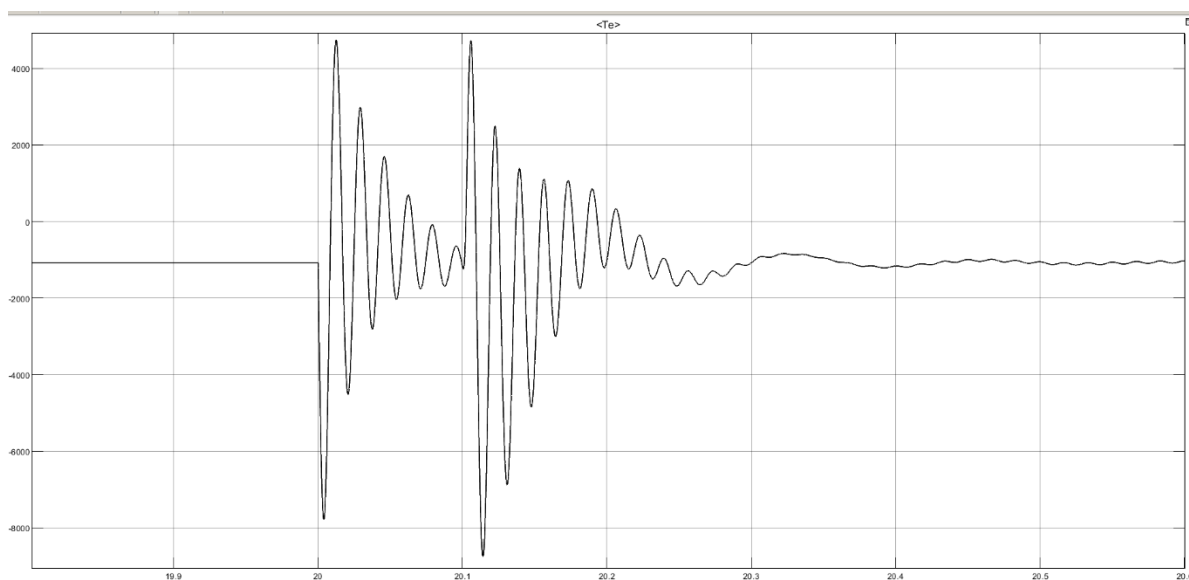


Рисунок 4.23 – Графік електромагнітного моменту асинхронного генератора при короткочасному короткомк замиканні в мережі

Цікаво відмітити, що електромагнітний момент АГ при прохідних к.з. може перевищувати 8000 Н·м (рис. 4.23) проти 2000 Н·м (рис. 4.19) в автономному варіанті функціонування. Але струм АГ при прохідному к.з., навпаки, змінюється набагато сприятливіше (максимальне відхилення – 1400 А (рис. 4.24) проти 2500 А (рис. 4.20) в автономному варіанті).

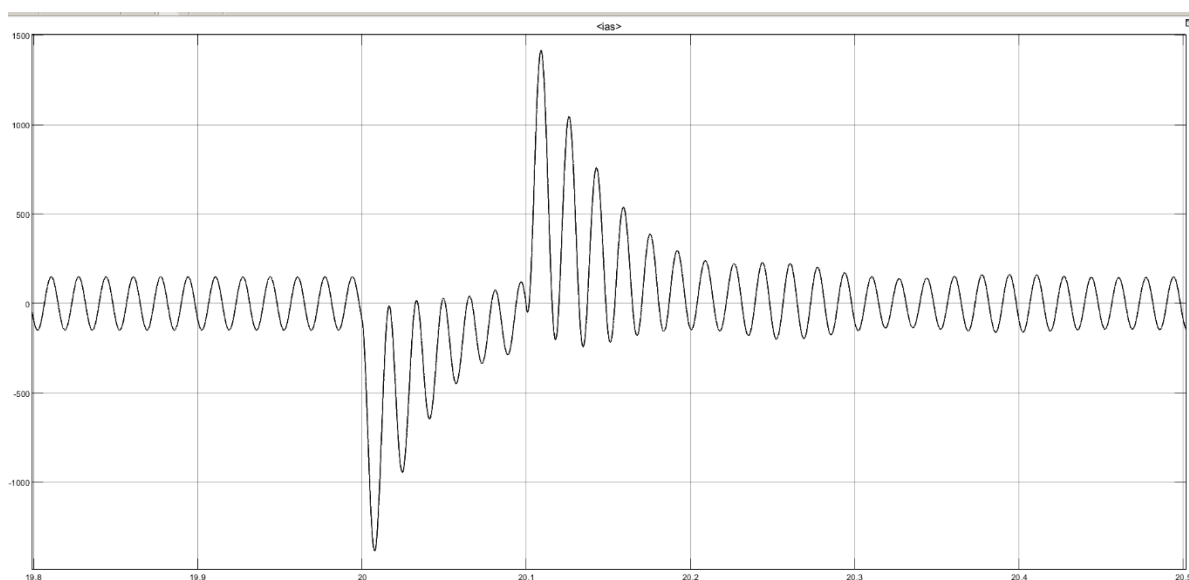


Рисунок 4.24 – Графік струму асинхронного генератора вітроенергетичної установки при короткочасному короткому замиканні в мережі

Як видно, підключення ВЕУ до зовнішньої системи електропостачання діє більш сприятливо на показники якості електропостачання, вона надає стабілізуючу дію на режими роботи автономної ВЕУ [11, 53, 57]. Але при цьому момент електромагнітний АГ досягає більш руйнівних величин (у 10 разів більше номінального значення). В автономному варіанті треба звернути увагу на негативний вплив від струму АГ – його різка зміна сприяє виникненню електромагнітних перешкод, тобто ложним спрацюванням захисту.

4.5 Розробка моделі автономної вітроенергетичної станції з паралельно працюючими в комплексі вісьмома вітрогенеруючими агрегатами

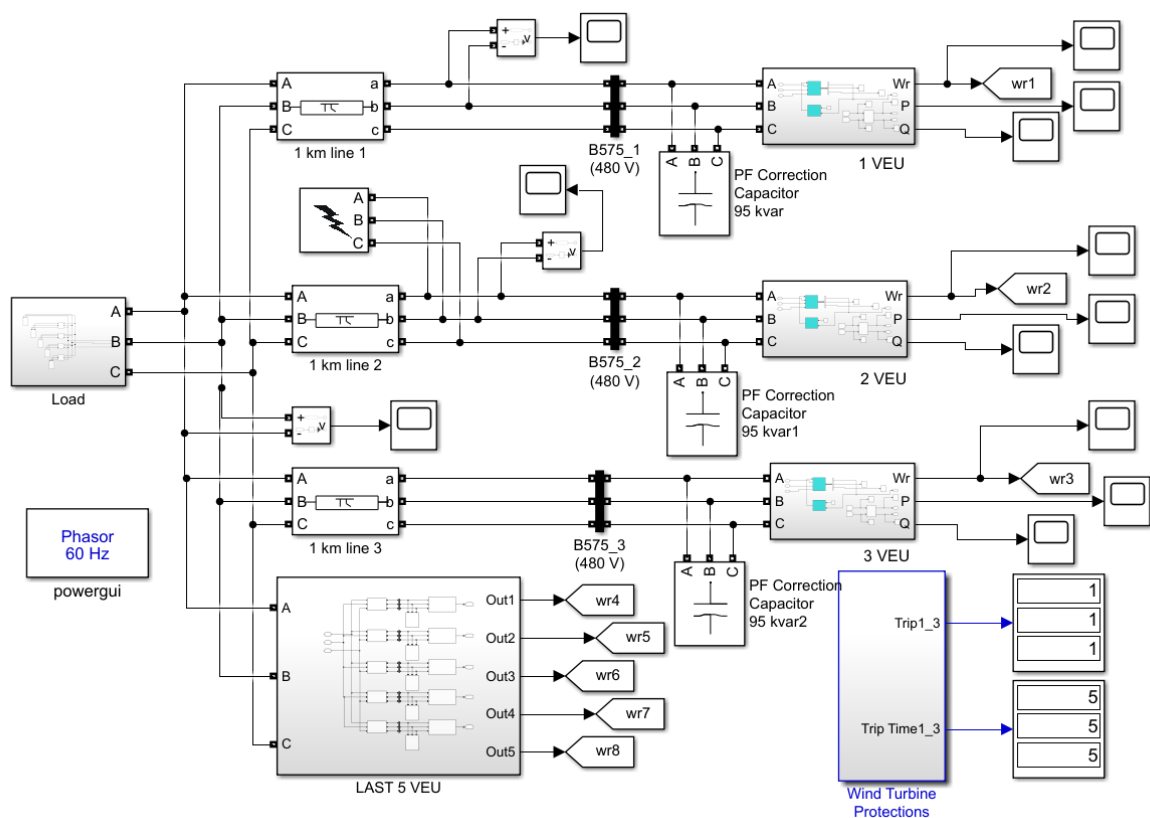


Рисунок 4.25 – Структура моделі автономної вітроенергетичної станції з 8 вітроенергетичними установками

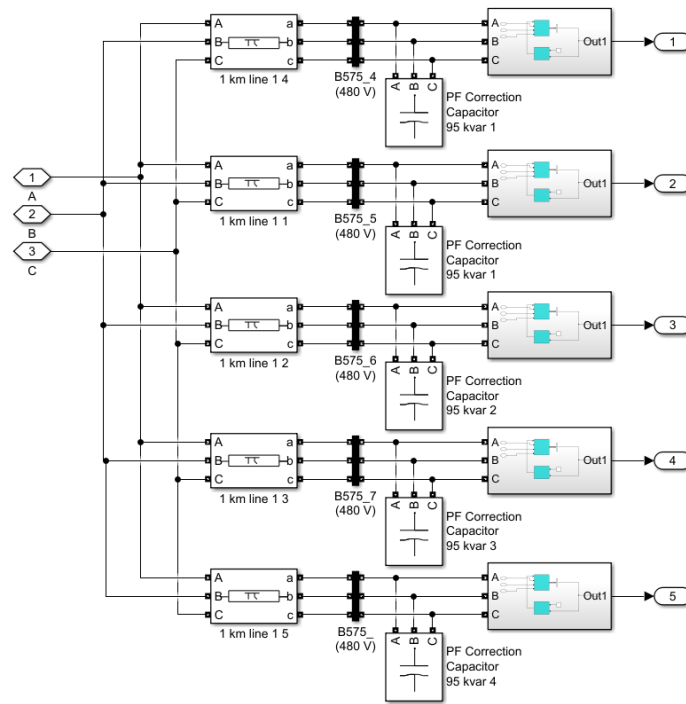


Рисунок 4.27 – Структура моделі підсистеми моделі LAST 5 VEU

Остаточно на рис. 4.28 показана структура підсистеми LOAD, яка містить 5 резисторів, які каскадно підключаються до загальної мережі, кожен в функції часу.

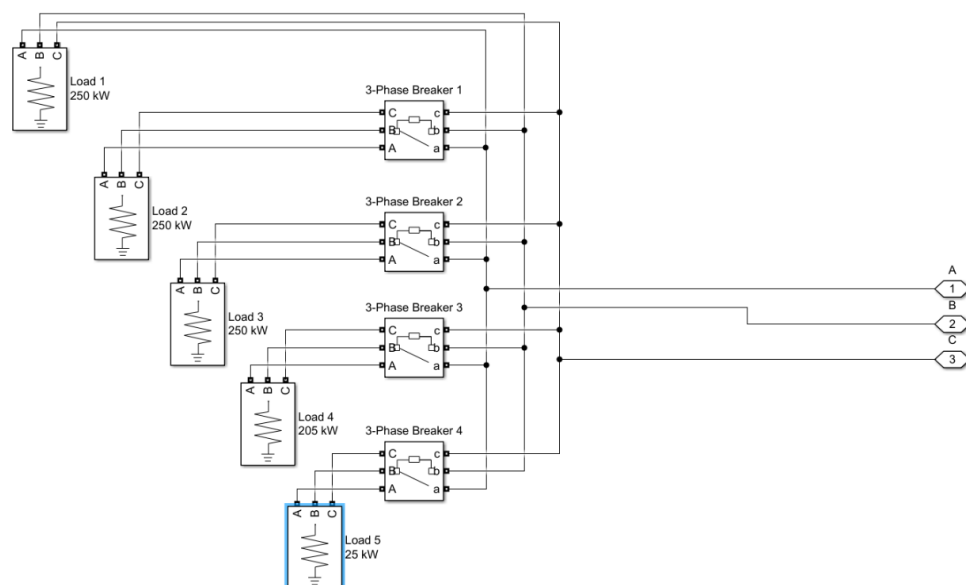


Рисунок 4.28 – Структура моделі підсистеми LOAD – дискретно перемикаємого навантаження автономної вітроенергетичної станції

4.6 Дослідження пуску вітроенергетичної установки в складі автономної вітроенергетичної станції

Важливою складовою моменту функціонування ВЕУ, а точніше, їх електромеханічних комплексів є режими пуску. Асинхронні електроприводи ВЕЦ можна запускати з попереднього неробочого стану (після профілактики, техогляду, ремонту, тощо) декількома способами [19, 36, 39]. Перший тривіальне відомий спосіб – прямий пуск АГ. Але через значну інерцію вітроустановки такий пуск буде йти порівняльно довго, причому пусковий режим АД буде значно впливати на режим роботи як АГ, так й решти вітроелектроустановок в складі ВЕС.

Якщо запускати АГ методом прямого пуску від автономної енергосистеми, яка складається з 8 ВЕУ, поєднаних один з одним через лінії довжиною 1 км, то така енергосистема «ляже», як це показане на рис. 4.33 [123]. Перші 100 сек. йдуть на це, щоб поступово та дискретно завантажити ВЕС навантаженням 800 кВт, далі на 100-ї секунді розпочинається власне пуск 8-ї ВЕУ методом прямого пуску АГ. Як видно, уся система стає непрацездатної. Решта ВЕУ збільшує швидкість майже у два рази (що означає також збільшення частоти також майже удвічі). Напруга на загальній точці автономної системи падає практично до нуля. АГ, що запускається, розганяється до незначних 0,006 в.о. швидкості.

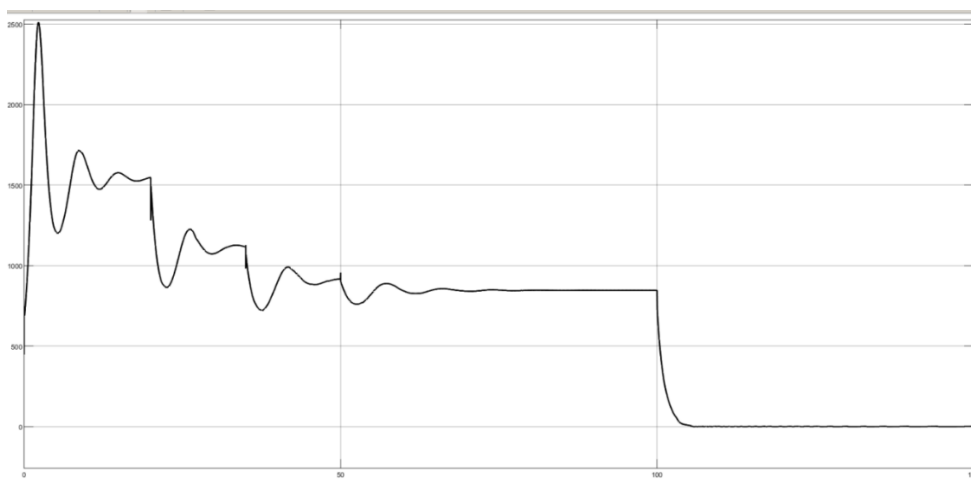


Рисунок 4.29 – Графік величини напруги в загальній точці автономної енергосистеми

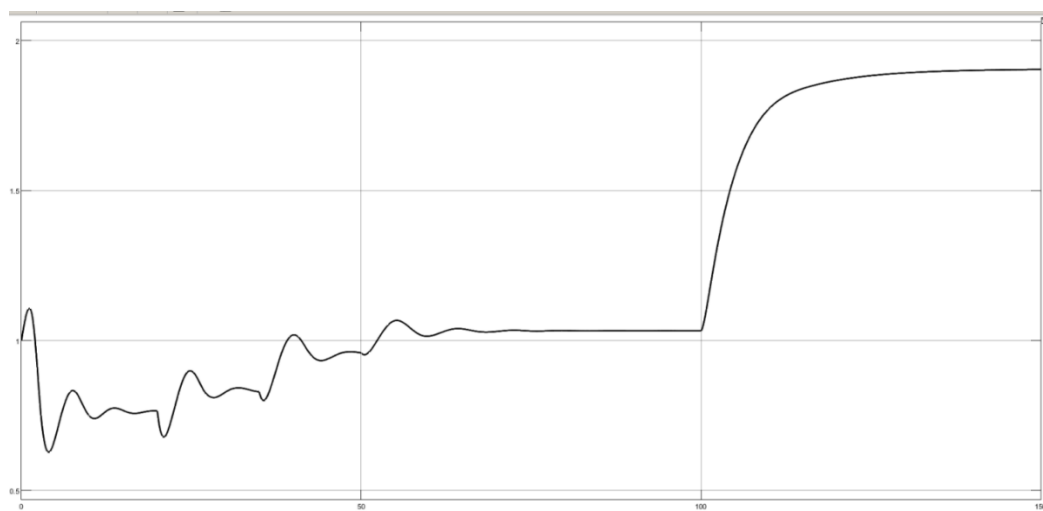


Рисунок 4.30 – Графік швидкості будь-якого асинхронного генератора з інших 7 вітроенергетичних установок

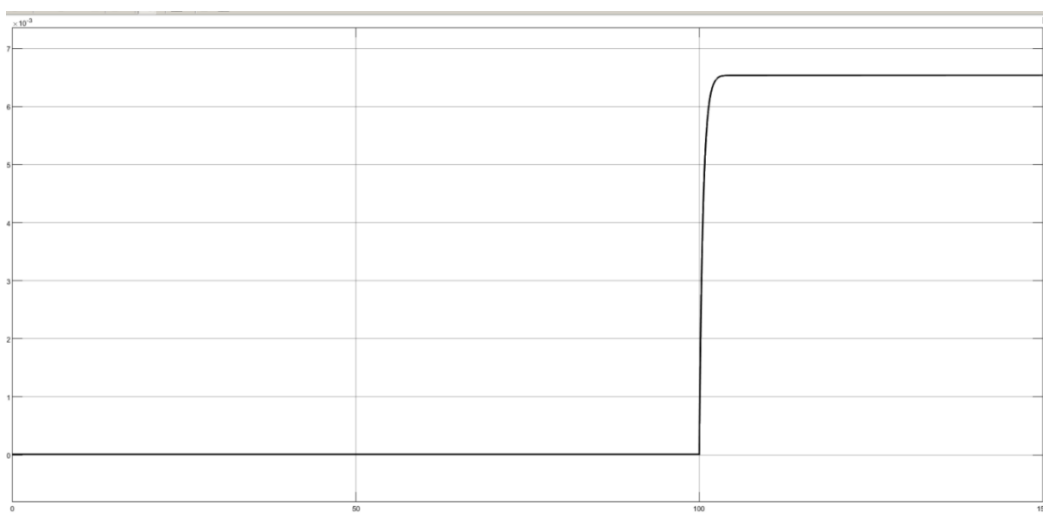


Рисунок 4.31 – Графік швидкості асинхронного генератора, що запускається

Тому в практиці використовують інший спосіб пуску – завчасний розгін АГ за допомогою вітряка з наступним підключенням його у мережу [115, 118–120]. Якщо на вітряк буде діяти вітер швидкістю 8 м/с, то час розгону ВЕУ буде значно менше, причому розгін йде нелінійно. Нелінійність пояснюється властивостями вітряка, та не має відношення до АГ. Як видно з рис. підключення 8-й ВЕУ до ВЕС з 7-и ВЕУ значно впливає на режим мережі. По-перше, судячи з частоти обертання валів АГ, частота мережі знижується на 7.6 %. Зрозуміло, що для відновлення попередньої частоти мережі треба змінювати ємність конденсаторів для всіх ВЕУ одночасно.

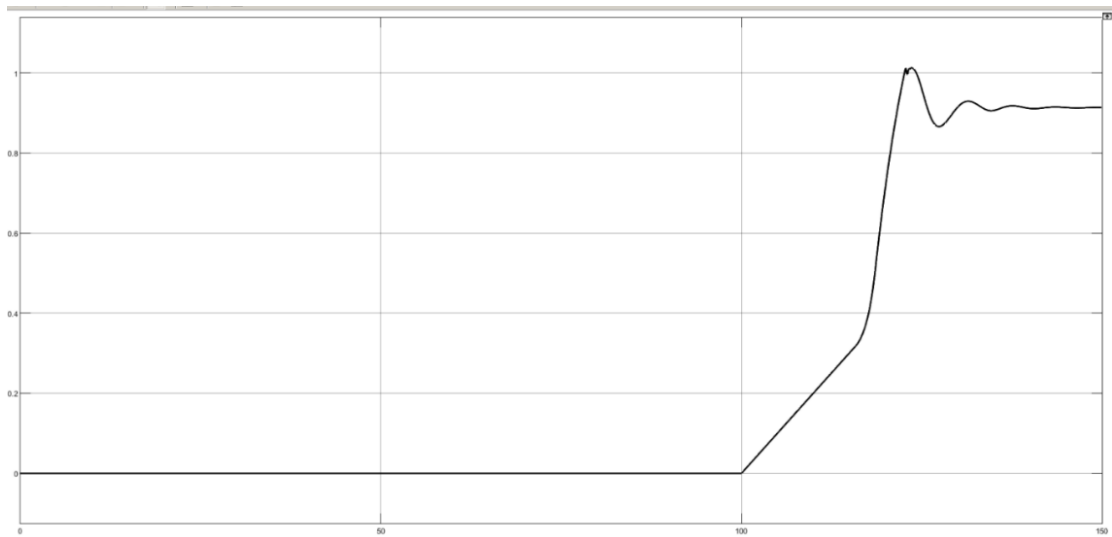


Рисунок 4.32 – Графік швидкості асинхронного генератора при розгоні від вітряка (підключення асинхронного генератора до мережі здійснюється біля 120 с)

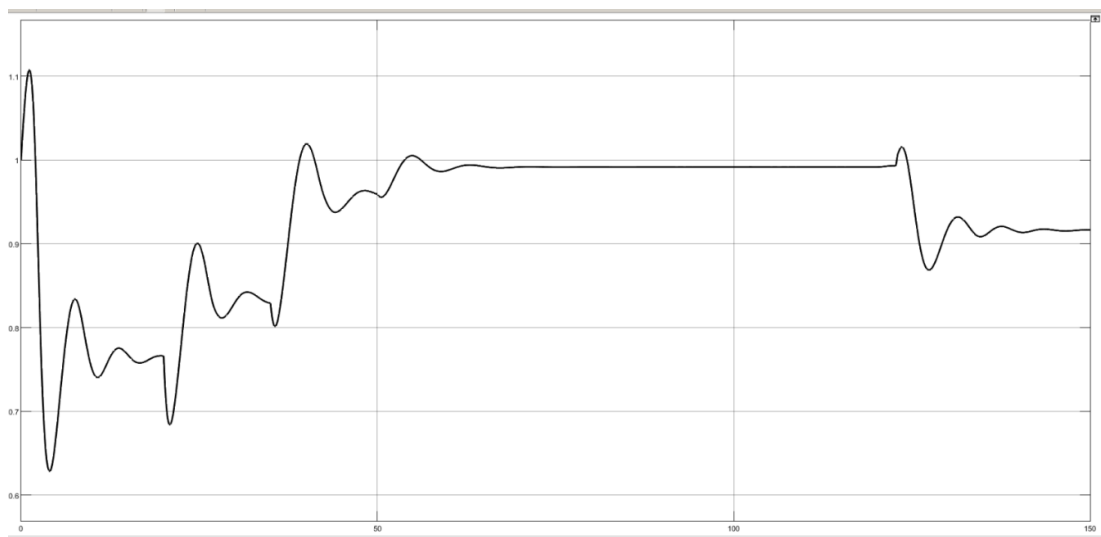


Рисунок 4.33 – Графік швидкості (частоти мережі) решти асинхронних генераторів вітроенергетичної станції при розгоні додаткової 8-ї ВЕУ

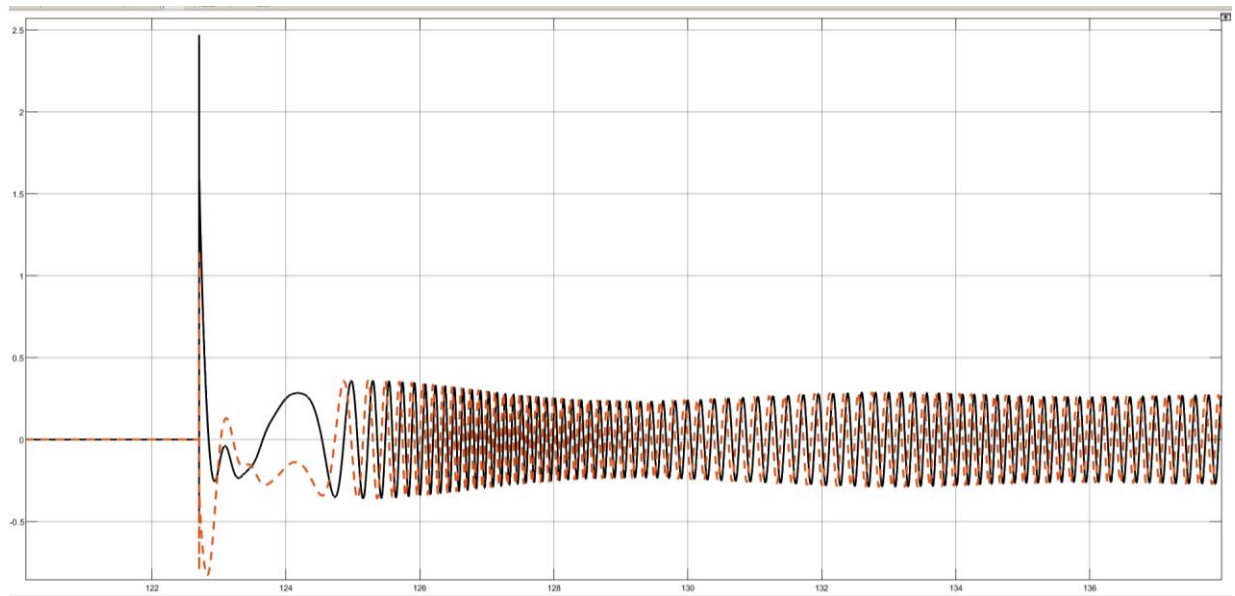


Рисунок 4.34 – Графіки активного та реактивного струмів асинхронного генератора, що запускається у автономну мережу вітроенергетичної станції

Особливу увагу треба звернути на струми АГ, що підключається до мережі – вони досягають значних величин (2.5 в.о.). Це значно вище, ніж струми при прямому асинхронному пуску АГ в мережу. Напруга в загальній точці автономної системи ВЕС, як видно, після збурення трохи підвищується.

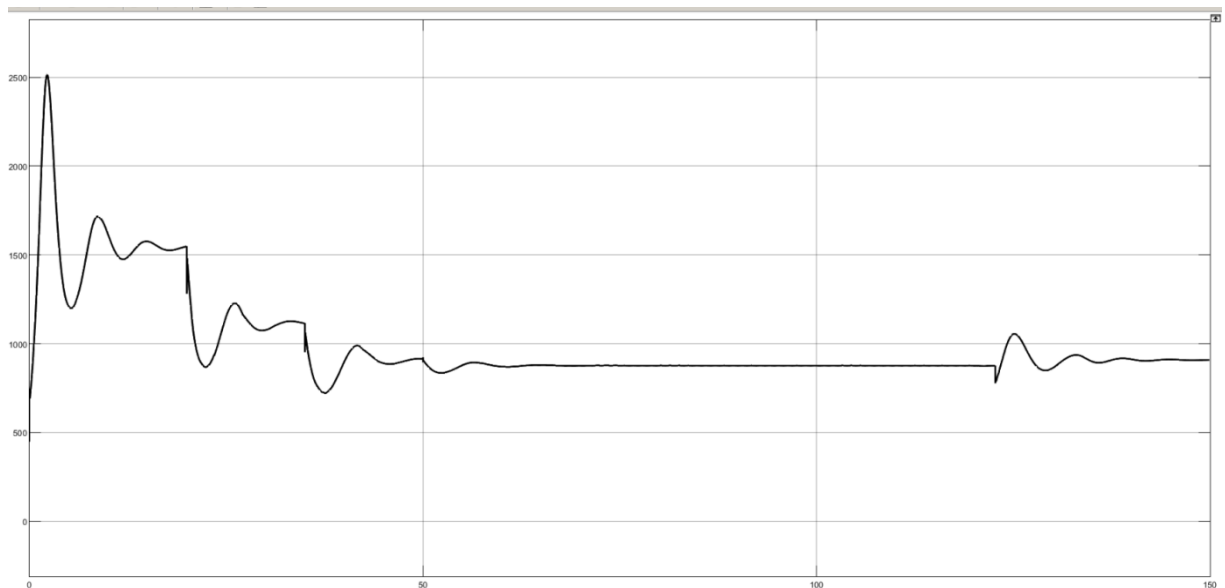


Рисунок 4.35 – Графік напруги в загальній точці автономної системи електропостачання з вітроенергетичною станцією

4.7 Автоколивання частоти в автономній системі вітроенергетичної станції

Під час багатоваріантних досліджень на моделі рис. 4.25 виникали режими, коли уся система знаходилася у автоколиваннях [104, 123]. Вони мали невеличкі амплітуди, наприклад, такі, як це показано на рис. 4.36, але усе же такий режим целесообразно прийняти небажаним. Частіше усього такий режим виникав при підключенні чергової ступені навантаження. Причому звертає на себе увагу та обставина, що автоколивання виникають при підключенні відносно малого навантаження. Так, для рис. 4.36 підключення перших 4 ступенів навантаження величиною 250 кВт кожний не викликає ніяких особливостей, процеси швидко затухають (що не показано на графіках через економію розрахункового часу), але підключення останнього ступеня величиною усього лише 50 кВт (що в 5 разів менше, ніж попередня ступень та в 20 разів менш, ніж усе навантаження) викликає невеличкі автоколивання у всій системі ВЕС. Причому будь-яке збурення, або підключення останнього ступеня хоча б 75 кВт замість 50 кВт повністю запобігає виникненню автоколивань.

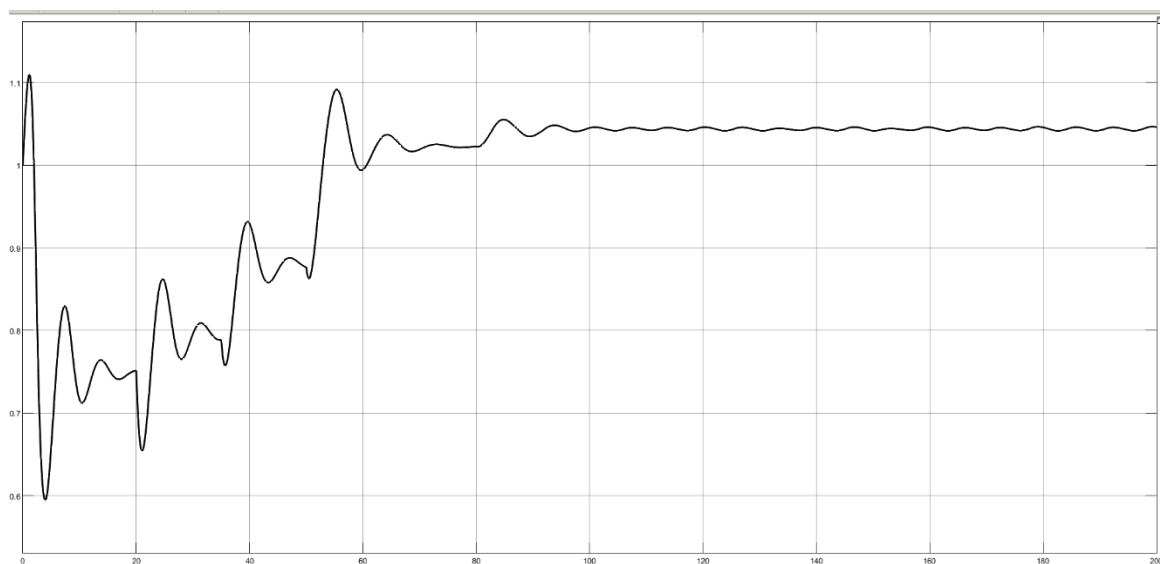


Рисунок 4.36 – Графік швидкості будь-якої вітроенергетичної установки при ступінчастому накиду навантаження

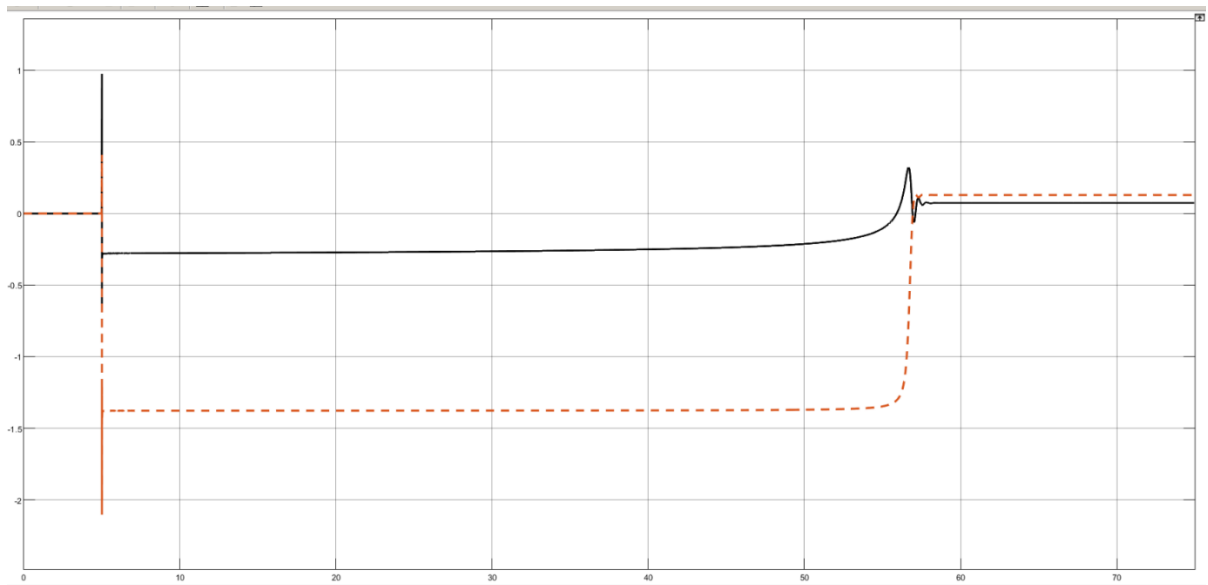


Рисунок 4.40 – Графіки активного (-) та реактивного (--) струмів асинхронного генератора (в.о.)

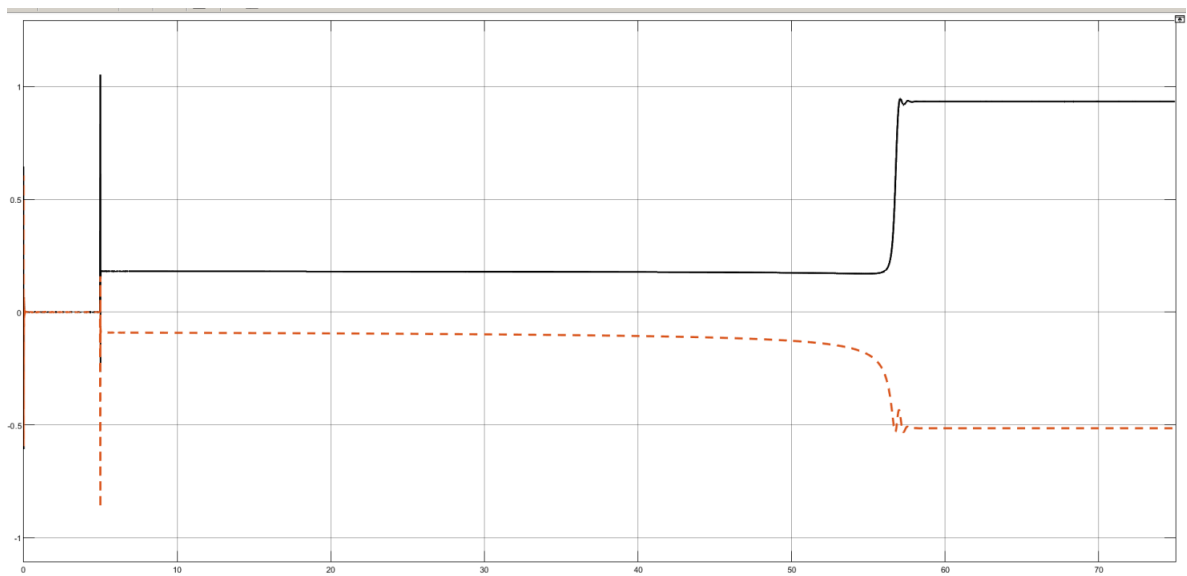


Рисунок 4.41 – Графіки активної та реактивної складової напруги на статорі асинхронного генератора

Як ми бачимо, прямий пуск, на відміну від «автономного варіанту», можливо здійснити, причому у вельми сприятливих умовах – зниження величини напруги на час пуску має досить малу величину 1,5 % [123]. Режим роботи інших 7 ВЕУ при цьому ніяк не порушується.

4.9 Дослідження впливу коротких замикань на режим вітроенергетичної установки разом з енергосистемою

Здійснимо короткочасне коротке замикання (0,01 сек) в момент часу 100 сек. Усі останні умови залишаються такими ж, як й для «автономного» варіанту (послідовне ступеневе підключення активного навантаження в моменти часу 20, 35, 50, 60 та 80 сек.). В результаті моделювання отримаємо наступні графіки перехідних процесів:

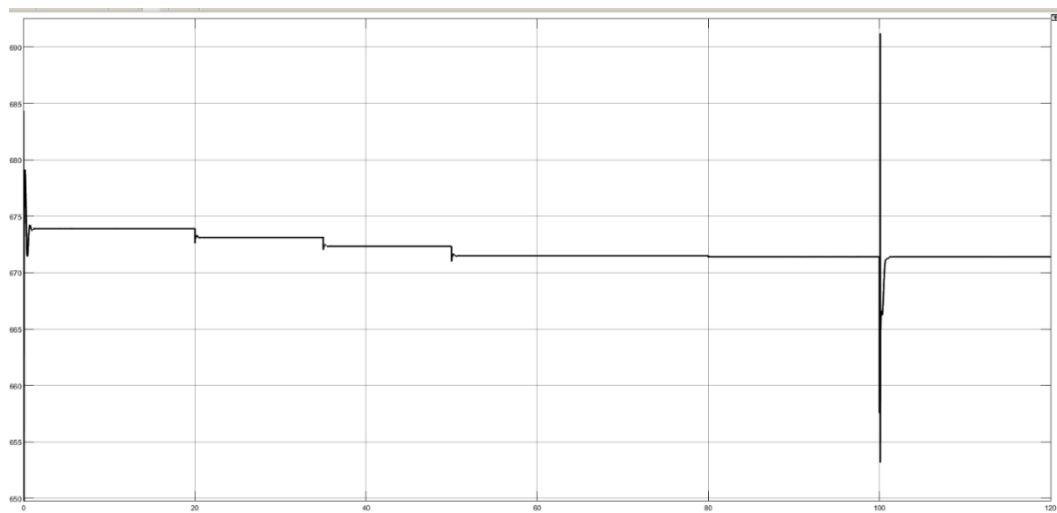


Рисунок 4.42 – Напруга в загальній точці системи (точці поєднання енергосистеми та вітроенергетичної установки)

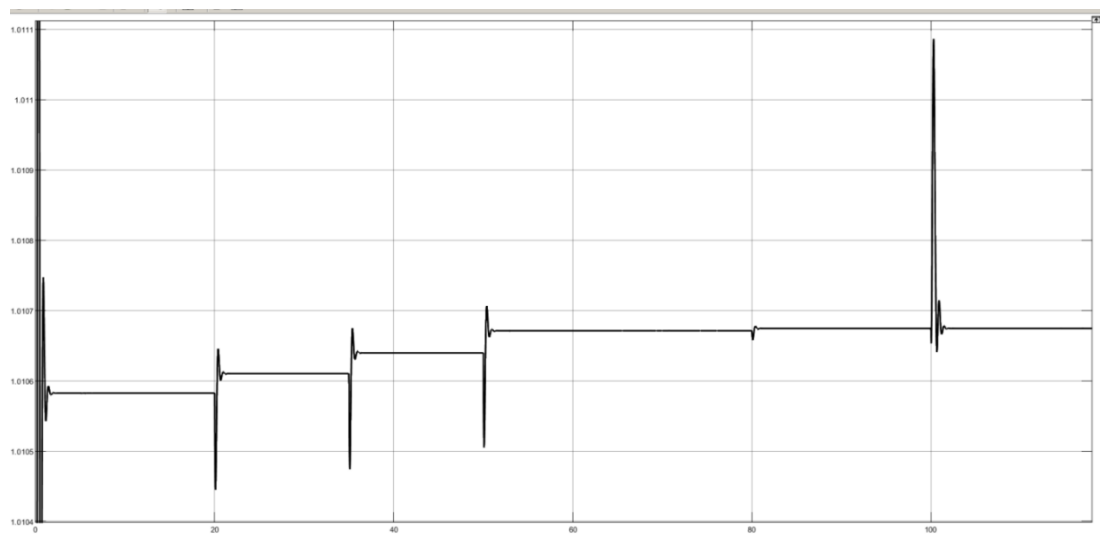


Рисунок 4.43 – Швидкість асинхронного генератора сусідньої вітроенергетичної установки у складі вітроенергетичної станції

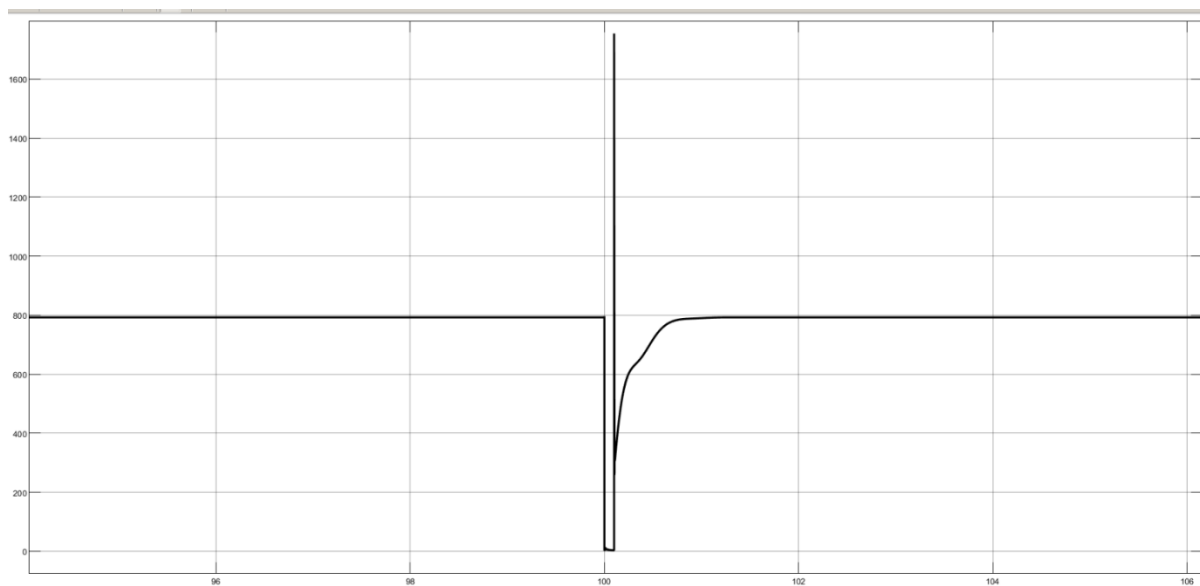


Рисунок 4.44 – Графік напруги на затискачах асинхронного генератора вітроенергетичної утсановки, де здійснювалось коротке замикання

Видно, що на відміну від режиму автономної роботи, при роботі разом з енергосистемою ступеневе підключення активного навантаження призводить до значно менших збурень. Напруга потрохи підвищується, що вимагає її корекції за допомогою зміни ємності конденсатору. Особливу увагу звертає на себе графік рис. 4.44, де напруга на затискачах АГ по закінченні КЗ зазнає вибросу напруги, що більш ніж у два рази, ніж попередня величина напруги до початку короткого замикання. Напруга в точці поєднання енергосистеми та ВЕС відхиляється набагато менше – на 2,2 % в обидва боки, й цим збуренням можна нехтувати.

4.10 Моделювання прогнозу генерації електроенергії вітроенергетичною станцією в умовах гірничо-збагачувальних комбінатів

До теперішнього часу розроблено значну кількість методів прогнозування електроспоживання, але не існує універсального методу, котрий міг би з однаковим успіхом застосовуватися для різних типів об'єктів [106–107]. Це викликано головним чином тим, що будь-який об'єкт

прогнозування, чи то регіональна енергосистема або конкретне промислове підприємство, має унікальний характер електроспоживання і складні залежності між електроспоживанням і факторами, що на нього впливають [104, 106]. У зв'язку з цим постає актуальне завдання вибору методики прогнозування електроспоживання, що відповідала б задовільній якості прогнозу [106].

1. *Сезонна модель авторегресійного проінтегрованого змінного середнього (АРПЗС) (ARIMA)*, розроблена Дж. Боксом і Г. Дженкінсом, дозволяє прогнозувати нестационарні циклічні тимчасові ряди. Сезонна модель Бокса-Дженкінса може бути представлена у вигляді [54]:

$$ARIMA(p, d, q) \cdot (P_S, D_S, Q_S)s \quad (4.1)$$

де p - порядок складової авторегресії; d - порядок різниці дискретної похідної; q - порядок змінного середнього; P_S - порядок сезонної авторегресії; D_S - порядок сезонної різниці (сезонної похідної); Q_S - порядок сезонного змінного середнього; s - період сезонності.

Нестационарні ряди, що містять сезонні коливання, приводять до стаціонарних, за допомогою взяття послідовних різниць між сусідніми елементами (несезонних різниць) і елементами, що відстають один від одного на значення періоду сезонності s .

Після взяття різниць ряд стає стаціонарним, тобто, що задовольняє умовам моделі (4.1). Різницевий ряд може бути представлений у вигляді:

$$\Delta Y_t = \Delta^d Y_t + \Delta^{D_S} Y_t, \quad (4.2)$$

$$\Delta^d Y_t = a_1 \cdot Y_{t-1} + \dots + a_p \cdot Y_{t-p} + \varepsilon_t - \beta_1 \cdot \varepsilon_{t-1} - \dots - \beta_q \cdot \varepsilon_q - 1 \quad (4.3)$$

$$\Delta^{D_S} Y_t = \gamma_1 \cdot Y_{t-s} + \dots + \gamma_{P_S} \cdot Y_{t-P_S \cdot s} + \varepsilon_t - \delta_1 \cdot \varepsilon_{t-s} - \dots - \beta_{Q_S \cdot s} \cdot \varepsilon_{t-Q_S \cdot s}, \quad (4.4)$$

де $\Delta^d Y$ - несезонна складова порядку p, d, q коефіцієнтів лінійної регресії α між елементами ряду Y_t і коефіцієнтів лінійної регресії β - між значеннями помилок ε_t ; $\Delta^{D_S} Y$ - сезонна складова порядку P_S, D_S, Q_S коефіцієнтів

лінійної регресії γ між елементами ряду Y_t і коефіцієнтів лінійної регресії δ між значеннями помилок ε_t .

Для повернення до вихідного тимчасового ряду і отримання прогнозу необхідно виконати зворотну операцію, тобто проінтегрувати дані:

$$Y_t = Y_{t-1} + Y_t \quad (4.5)$$

2. Метод експоненціального згладжування найбільш ефективний при розробці середньострокових прогнозів при прогнозуванні тільки на один період вперед. Його основними перевагами є простота процедури обчислень і можливість обліку об'єму вихідної інформації [106]. Робоча формула методу експоненціального згладжування [104]:

$$S_t = a \cdot \gamma_t + (1 - a) \cdot S_{t+1} \quad (4.6)$$

де t – період, що передуює прогнозованому; $t+1$ – прогнозний період; S_{t+1} – прогнозований показник; a – параметр згладжування; γ_t – фактичне значення досліджуваного показника за період, що передуює прогнозованому; S_t – експоненціально зважена середня для періоду, що передуює прогнозованому.

3. Прогноз за допомогою нейронних мереж

Використання нейронних мереж позбавить нас від необхідності дотримуватися якоїсь певної сезонної або трендової моделей.

Головним поняттям використаного методу є нейрон – спеціальна нервова клітина, що здатна сприймати, перетворювати та розповсюджувати сигнали. З'єднані між собою нейрони утворюють мережу, що моделює роботу мозку. Ця модель здатна отримувати інформацію ззовні та має властивість самонавчання.

З математичної точки зору модель нейрона будує нелінійне перетворення вхідного сигналу у вихідний сигнал.

Теорично доведено, що за допомогою таких найпростіших перетворень можна наблизити дуже важкі багатомірні функції, отже, оцінювати важкі залежності.

Вхідний шар нейронів слугує для введення значень вхідних змінних, вихідний шар – для виведення результатів [106–107]. Послідовність шарів нейронів та їх з'єднання називається архітектурою мережі.

Для побудови нейронної мережі необхідно обрати: тип мережі, кількість прихованих нейронів, кількість навчальних та зберігаючих мереж, а також тип використаних функцій помилок.

Для короткострокового прогнозування виробітку електроенергії ВЕС на один день були використанні статистичні дані швидкостей вітру за метеостанцією в м. Горішні Плавні за повний місяць з інтервалом 3 год [14]. Дані були взяті для двох різних пір року, для січня та липня, адже в січні спостерігається найбільші показники швидкості вітру, а в липні найменші. Після чого ці дані за формулою Хелмана були перераховані на висоту відвалу, і далі розраховано дані фактичної генерації ВЕС за повний місяць [14, 88].

За допомогою програми «Statistica» було побудовано графіки фактичного виробітку електроенергії ВЕС за липень 2020 року, що показано на рис. 4.45 [14, 88, 106].

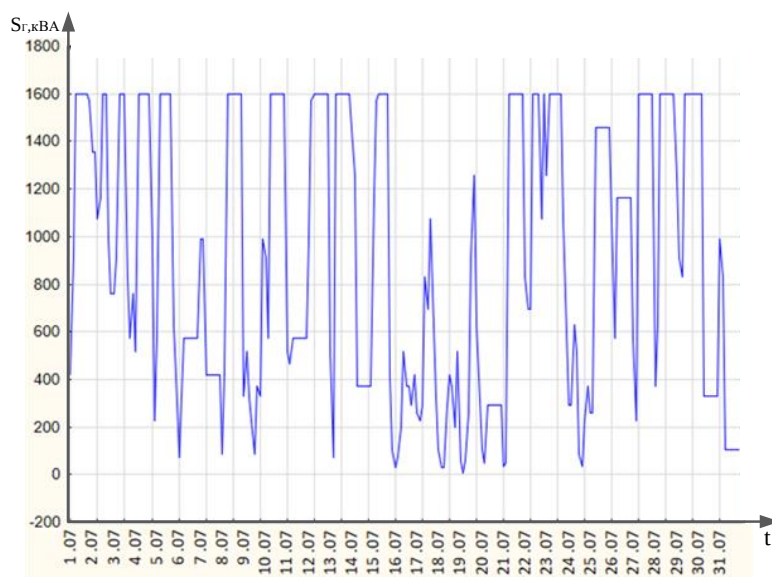


Рисунок 4.45 – Графік фактичного виробітку електроенергії вітроенергетичною станцією за липень 2020 року

Далі за допомогою сезонної моделі авторегресійного проінтегрованого змінного середнього було виконано прогноз, який зображений на рис. 4.46 [14]..

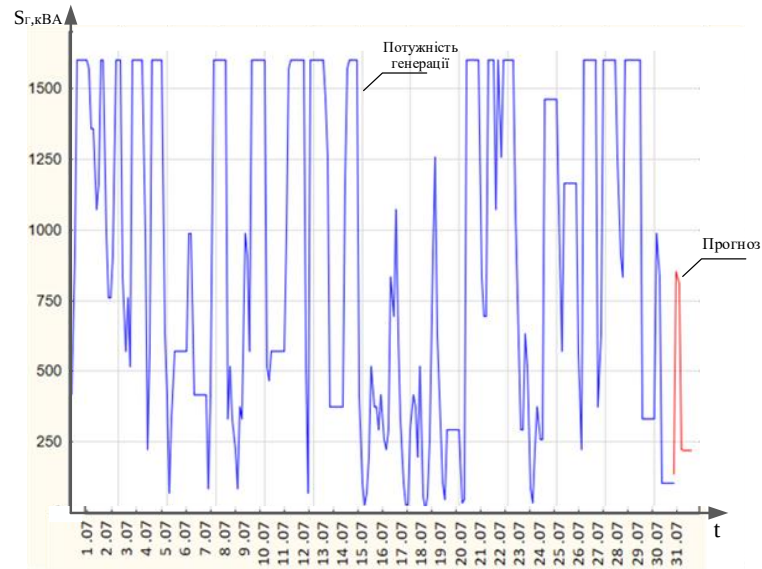


Рисунок 4.46 – Авторегресійна модель прогнозу виробітку електроенергії вітроенергетичною станцією

Далі на рис. 4.47 представлено прозног методом експоненціального згладжування [14]..

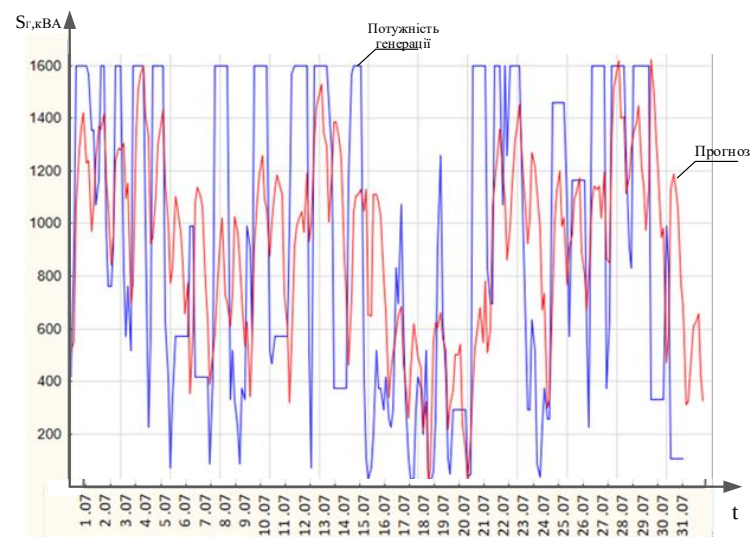


Рисунок 4.47 – Прогноз виробітку електроенергії вітроенергетичною станцією методом експоненціального згладжування

Далі було виконано прогноз виробітку електроенергії за допомогою нейронних мереж, що представлено на рис. 4.48 [14].

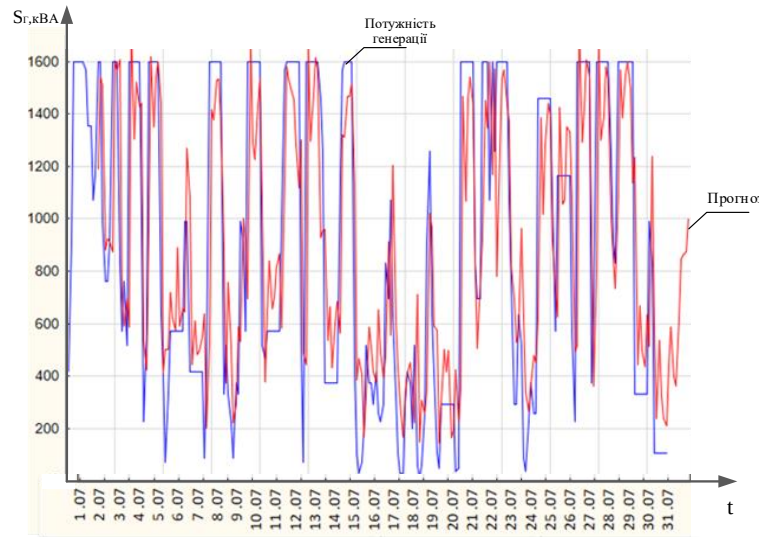


Рисунок 4.48 – Прогноз виробітку електроенергії вітроенергетичною станцією за допомогою нейронних мереж

Далі представлено графіки фактичного виробітку електроенергії ВЕС за січень 2020 року та прогноз на один день [14].

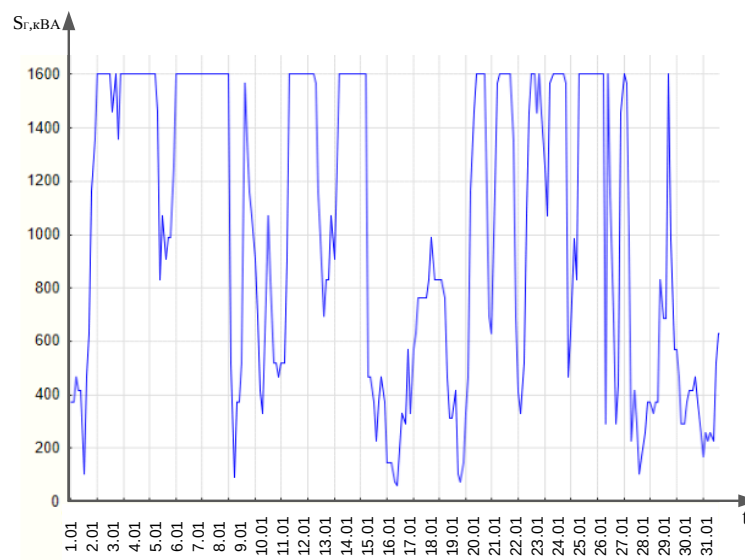


Рисунок 4.49 – Графік фактичного виробітку електроенергії вітроенергетичною станцією за січень 2020 року

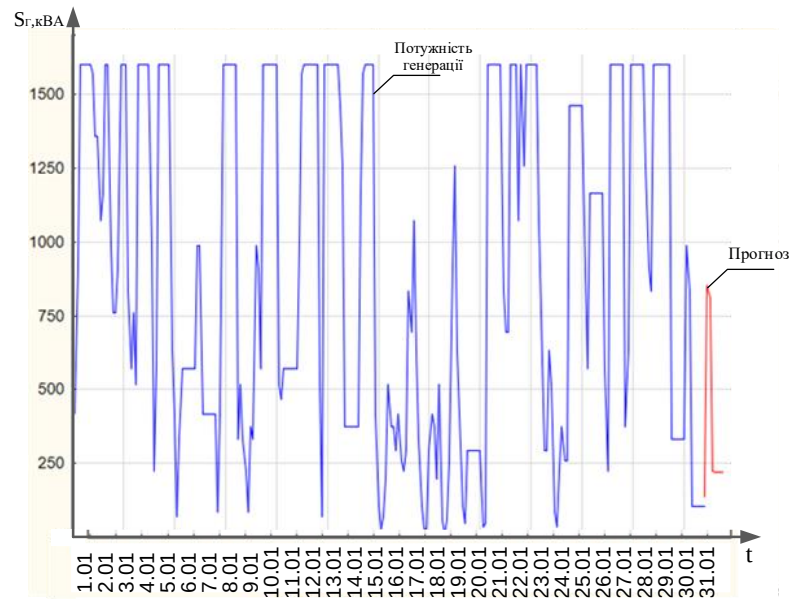


Рисунок 4.50 – Авторегресійна модель прогнозу виробітку електроенергії вітроенергетичною станцією

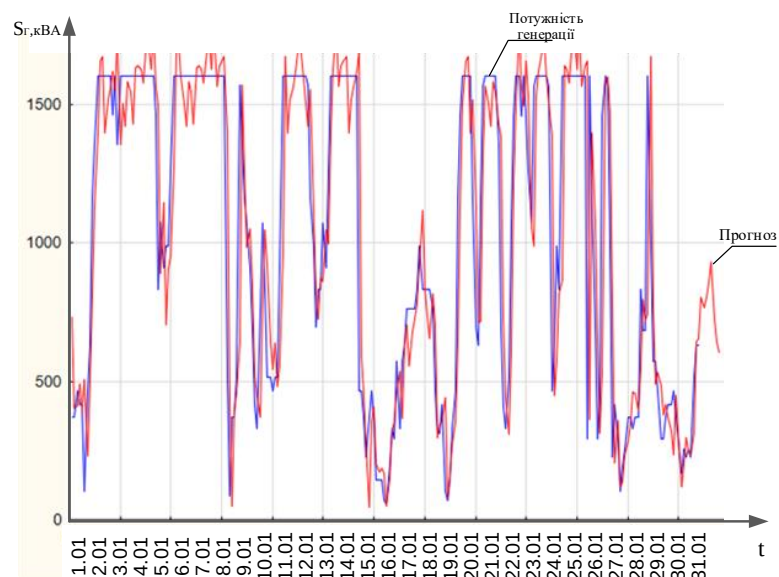


Рисунок 4.51 – Прогноз виробітку електроенергії вітроенергетичною станцією методом експоненціального згладжування

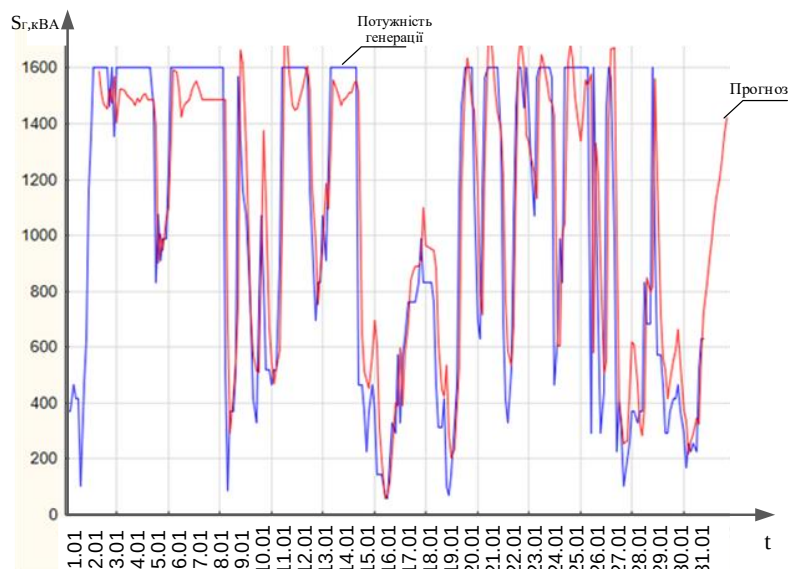


Рисунок 4.52 – Прогноз виробітку електроенергії вітроенергетичною станцією за допомогою нейронних мереж

В подальшому, згідно пропонуємого методу, побудовано проноз виробітку електроенергії ВЕС на лютий 2020 року, виходячи з реальних статистичних даних швидкостей вітру за листопад, грудень та січень, що показано на рис. 4.53 [14].

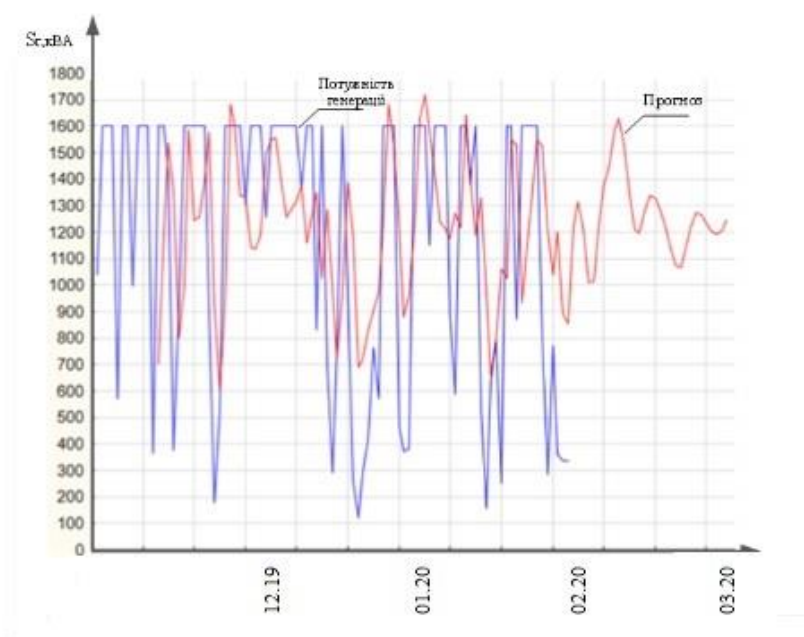


Рисунок 4.53 – Прогноз виробітку електроенергії вітроенергетичною станцією на лютий 2020 року за допомогою нейронних мереж

4.11 Висновки до розділу 4

1. Режим роботи автономної одиночної вітроенергетичної установки більш підвержений коливанням параметрів при зміні різних збурюючих впливів, ніж при сумісній роботі з енергосистемою, але при розробці та відповідному налаштуванні регуляторів параметрів одиночна вітроенергетична установка цілком здатна втримати всі свої параметри (частоту та напругу) в межах, припустимих стандартом якості електроенергії для промислових споживачів.

2. При паралельній роботі збалансованої одиночної вітроенергетичної установки з енергосистемою усі процеси йдуть більш менш нормально, та набагато стабільніше, але в момент накиду активного навантаження біля одиночної вітроенергетичної установки активна потужність енергосистеми на долі секунди зазнає швидкоплинного викиду активної потужності тої ж самої величини, що й величина накиду навантаження.

3. Емність збудження асинхронного генератору одночасно здійснює дві функції: власне збудження асинхронного генератору в автономному режимі роботи вітроенергетичної установки та компенсацію реактивної потужності для енергосистеми при сумісній роботі вітроенергетичної установки та енергосистеми.

4. Короткі замикання в автономній вітроенергетичній установці, що не працює на зовнішню мережу електропостачання, викликають значні порушення режиму роботи електроустановки, нормальний режим відновлюється досить повільно. Напруга статора при цьому спадає до 20 % від номінального значення, а частота живлячої мережі перевищує номінальну на 16 %. Графік струму у початковий момент короткого замикання у 13 разів перевищує попереднє значення. Короткі замикання в вітроенергетичній установці, що підключена до зовнішньої енергосистеми протікають значно легше, а номінальний режим швидко відновлюється.

5. В автономній системі вітроенергетичної вітроенергетичної станції при деяких умовах (навантаження близьке до номінального), на накид додаткового незначного (5% від номінальної величини) навантаження виникають автоколивання незначного розмаху. Вони дуже нестійкі, подавляються будь-якими збуреннями, але вони свідчать про потенціальну нестійкість усієї системи при певних умовах.

6. Коротке замикання в вітроенергетичній станції разом із системою при деяких умовах призводить до викиду напруги в точці замикання до подвійного значення від номінального. На це треба звернути увагу, щоб це не призводило до помилкових спрацювань захистів в системі.

7. Так як фактичне число виробітку потужності вітроенергетичною станцією впливає на графік прогнозу споживання електроенергії підприємством із загальної мережі, то було побудовано графіки прогнозу виробітку електроенергії на один день та на місяць, виходячи з реальних статистичних даних швидкостей вітру за липень, листопад, грудень та січень 2020 року по конкретній метеостанції, за допомогою трьох методів:

- авторегресійної моделі прогнозу;
- методу експоненціального згладжування;
- за допомогою нейронних мереж.

Виходячи з графіків прогнозу виробітку електроенергії, можна зробити висновок, що прогноз обсягів виробітку електроенергії за допомогою нейронних мереж є найбільш точним, так як він дозволяє наблизити «важкі» багатомірні функції до варіантів нескладних рішень, що в свою чергу спрощує, без погіршень у визначенні, оцінювання складних залежностей.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі досліджено та наведено новий варіант бачення вирішення проблеми підвищення енергоефективності систем електропостачання гірничих підприємств з відкритим способом видобутку залізорудної сировини, що відрізняється від відомих варіантів синергетичністю підходу до створення у складі систем електропостачання даних видів підприємств локальних систем з автономними джерелами живленням віддалених приймачів електричної енергії, що, в кінцевому варіанті, дозволяє знизити втрати електричної енергії та підвищити надійність і безперебійність електропостачання.

За результатами виконаних при написанні дисертаційної роботи досліджень зроблено наступні висновки:

1. Обґрунтовано та визначено на основі відомих рішень нове бачення застосування вітроенергетичних комплексів у структурах систем електропостачання вітчизняних гірничо-збагачувальних комбінатів для живлення територіально віддалених локальних об'єктів споживання електричної енергії. Доведено доцільність запропонованих синергетичних варіантів систем електропостачання та визначено очікуваний енергетичний потенціал у відповідності до різних варіантів розбудови комплексів вітроенергетичних станцій.

2. На основі експериментальних даних визначено реально очікувані середні значення швидкості повітряного потоку в місцях розташування залізорудних підприємств – близько 4,1 м/с. Враховуючи можливість та необхідність встановлення вітроенергетичних установок на відвалах і шламосховищах гірничо-збагачувальних комбінатів, встановлено, що це дає додатково до природнього рівня значний приріст швидкості потоку повітря – швидкість складає близько 7 м/с, чого достатньо для ефективного використання даних видів генераторів електричної енергії.

3. Розроблено, обгрунтовано та оцінено варіанти можливої дислокації вітроенергетичних установок в умовах ландшафтів відвалів пустих порід збагачувальних комбінатів на основі типового гірничо-збагачувального комбінату, що дозволило визначити потенціал оптимальності як одиничних електричних потужностей, так і загальну потужність усього локального автономного енергетичного комплексу зі встановленням комплексного взаємозв'язку між окремими складовими блоками та включенням їх у цілісну систему електропостачання підприємства, у варіанті розподіленої генерації електричної енергії.

4. Обгрунтовано та розроблено алгоритм функціонування системи керування електропостачанням, згідно якого передбачається робота вітроенергетичної станції у трьох режимах: автономному, локальному і на розподільчу електромережу підприємства. Сформатизований алгоритм роботи системи керування вітроенергетичною станцією враховує та адаптивно реагує на потенційно можливі проблеми в роботі системи керування.

5. Виходячи із статистичних даних швидкостей повітряних потоків, запропонована на основі модернізованих методів авторегресійної моделі прогнозу, методу експоненціального згладжування та нейронних мереж, методика розробки графіків прогнозного виробітку електроенергії вітроенергетичною станцією з диференціюванням по днях і місяцях.

Зроблено висновок, що прогноз виробітку електроенергії за допомогою запропонованого методу є найбільш точним серед відомих, адже дозволяє наблизити результати багатомірних функцій до отримання результатів із мінімальними похибками.

6. Адаптована модель розробленої системи автоматичного керування для оцінювання енергоефективних рівнів функціонування вітроенергетичних установок дає можливість досліджень як в одиночному, так і в груповому варіантах функціонування на одне навантаження.

Встановлено, що в одиночному режимі функціонування вітроенергетичної установки автономна система при зміні збурюючих впливів підлягає більшому коливанню електричних параметрів, ніж у варіанті сумісної роботи з енергосистемою, що потрібно враховувати при розробці таких систем.

7. Розроблений і запропонований варіант структури схеми функціонування вітроенергетичної станції забезпечує потрібну стійкість до таких, що мають місце у практиці функціонування систем електропостачання гірничорудних підприємств, накидів напруги при імпульсному збільшенні рівнів навантаження на лопаті вітрогенераторів та виникненні коротких замикань у комплексах вітроенергетичних станцій.

8. Отримані в ході досліджень результати передані провідним спеціалізованим підприємствам із проєктування, розробки та монтажу систем електропостачання для гірничовидобувних підприємств України: ТОВ «НПК Криворіжелектромонтаж» та ТОВ «Рудомайн» (м. Кривий Ріг). (Акти передачі-впровадження додаються – Додаток Є).

Очікуваний економічний ефект від розробки та впровадження у практику роботи типових вітчизняних гірничо-збагачувальних комбінатів рекомендованих варіантів локальних мереж у складі загальної системи електропостачання цих підприємств, згідно оцінювання спеціалізованих підприємств, складе близько 10 млн. грн./рік. Термін окупності проєкту близько 6 років.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Енергетична стратегія України за період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017р. №605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p> (дата звернення: 11.12.2019).

[2] Енергетична ефективність України. Кращі проектні ідеї [електронне видання]: Проект: «Професіоналізація та стабілізація енергетичного менеджменту в Україні»/ Уклад.: С.П. Денесюк, О.В. Коцар, Ю.В. Чернецька. – К.: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2016. – 79с.

[3] Ю. Г. Вілкул, А. А. Азарян, В. А. Колосов, Ф. І. Караманиць, та А. С. Батареев, «Сучасний стан залізорудної галузі, прогноз розвитку та пропозиції», *Качество минерального сырья. Сб. науч. тр.*, т. 1, с. 9-24, 2017.

[4] І. О. Сінчук, Э. С. Гузов, В. А. Кольсун, В. С. Козлов, С. М. Бойко, та О. Є. Мельник, *Енергозбереження на підприємствах гірничовидобувної промисловості. Проблеми, шляхи реалізації: Монографія*. Кременчук, Україна: ПП Щербатих О. В., 2016.

[5] С. Денесюк, Г. Стрелкова, К. Пфайфер, М. Стрелков, та О. Іщенко «Європейські тенденції інноваційного розвитку в енергетичному секторі та сферах кінцевого енергоспоживання», *Енергетика: економіка, технології, екологія*, №2. с. 7-19. 2018.

[6] Сінчук О. М. Энергоэффективность железорудных производств. Оценка, практика повышения. моногр. / О. М. Сінчук, И. О. Синчук, Э. С. Гузов, А. Н. Яловая, С. Н. Бойко // Изд LAP LAMBERT Academic Publishing is managed by OmniScriptum Management GmbH. – 2016. – 346 с.

[7] I. Sinchuk «Harmonization of modeling systems for assessing the electric power consumption levels at mining enterprises», *Mining of Mineral Deposits*, 12, pp.100-107, 2018.

[8] В. Розен, І. Соколовська, Є. Іншеков, та І. Стоянкова. «Удосконалення механізму впровадження директиви 2012/27/EU про

енергоефективність шляхом адаптації міжнародних стандартів з енергоменеджменту на національному рівні», *Проблеми загальної енергетики*, вип. 4(43), с. 52-57, 2015.

[9] Электрификация горного производства: Учебник для вузов: В 2-х т. / Под ред. Л.А. Пучкова и Г.Г. Пивняка. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2007. -Т.1. – 511 с.; Т.2. – 595 с.

[10] Электрооборудование и электроснабжение горнорудных предприятий/Под. ред. В.С. Виноградова. – М.: Недра, 1983. – 335 с.

[11] Бойко С. М. Теоретичні засади формування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації гірничорудних підприємств : монографія / С. М. Бойко ; за ред. О. М. Сінчука. – Кременчук : Щербатих О. В., 2020. – 260 с.

[12] S. Boiko, I. Sinchuk, F. Karamanyts, I. Kozakevych, M. Baranovska, and O.Yalova, *Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises electricity supply systems*. Warsaw, Poland: «iScience» Sp. z o. o., 2018.

[13] Сінчук О. М., Бойко С. М., Федотов В. О., Дозоренко О. В. До питання формування енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації електричної енергії гірничорудних підприємств. Розвиток промисловості та суспільства, КНУ, 2021.

[14] І. О. Сінчук, С. М. Бойко, І. В. Касаткіна, О. В. Дозоренко. Аспекти розвитку вітроенергетики в умовах залізорудних підприємств // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2021. – Вип. 52. – С. 70–76. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-52-70-77>.

[15] Sinchuk, O., Sinchuk, I., Beridze, T., Filipp, Y., Budnikov, K., Dozorenko, O., & Strzelecki, R. (2021). Assessment of the factors influencing on the formation of energy-oriented modes of electric power consumption by water-drainage installations of the mines. *Mining of Mineral Deposits*, 15(4), 25-33. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.025>.

[16] Modeling tools for improving energy efficiency of water drainage complexes at iron ore underground mines / Sinchuk I. O., Somochkyn A. B., Budnikov K.V., Somochkina S. V., Baranovskyi V. D., Danilin O. V. // Herald of Advanced Information Technology. – 2022. – Vol. 5, No. 1. – Pp. 40-51. <https://doi.org/10.15276/hait.04.2022.4>.

[17] Дмитренко Л.В. Вітроенергетичні ресурси в Україні / Л.В. Дмитренко, С.Л. Барандіч // Наук. пр. УкрНДГМІ. – 2007. – Вип. 256. – С. 166-173.

[18] Дослідження вітрового режиму України, виявлення основних кліматоутворюючих факторів глобального і регіонального масштабів, які обумовлюють сучасні особливості вітрового режиму України: Аналіз даних довгострокових спостережень вітропотенціалу на гідрометеорологічних станціях України. Том 1: Звіт з НДР / МНТЦ вітроенергетики НАНУ. – К., 2001. – 136 с.

[19] Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с. ISBN 978-966-350-526-8.

[20] Безруких П. П. Ветроэнергетика : справ. и метод. пособие / П. П. Безруких. – М. : ИД ЭНЕРГИЯ, 2010. – 320 с.

[21] Безруких П. П. Использование энергии ветра. Техника, экономика, экология / П. П. Безруких. – М. : Колос, 2008. – 196 с.

[22] Елистратов В. В. Использование возобновляемой энергии : учеб. пособие / В. В. Елистратов. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 250 с.

[23] Чиринда М.-В. А. Ефективність використання вітроенергетики // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції за участю іноземних студентів «Розвиток аграрного бізнесу в умовах глобалізації» 15-17 квітня 2016р. Тернопіль, ТНЕУ, - 2016, С. 204 – 206.

[24] Z. Dar, K. Kar, O. Sahni, J. H. Chow, Windfarm power optimization using yaw angle control, *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 8 (1) (2016) 104–116.

[25] Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. – К.: ТОВ «ВіолаПрінт», 2008. – 55 с.

[26] P. Veers, K. Dykes, Lantz, et al., Grand challenges in the science of wind energy, *Science* 366 (6464) (2019) eaau 2027.

[27] Є. К. Бабець, І. Є. Мельникова, С. Я. Гребенюк, та С. П. Лобов, *Дослідження техніко-економічних показників гірничодобувних підприємств України та ефективність їх роботи в умовах змінної кон'юктури світового ринку залізорудної сировини*. Кривий Ріг, Україна: Вид. Р. А. Козлов, 2015.

[28] I. Sinchuk, S. Boyko, M. Baranovska, I. Kozakevych, A. Syomochkyn, D. Kalmus, I. Peresunko, M. Vinnik, N. Lokhman, and V. Chornay. *Brief commentaries on the problem of power consumption management at iron ore underground mines*. Warsaw, Poland: «iScience», 2019.

[29] Гайко Г. І., Білецький В. С. Історія гірництва: Підручник. – Київ-Алчевськ: Видавничий дім «Києво-Могилянська академія», видавництво «ЛАДО» ДонДТУ, 2013. – 542 с.

[30] Критерії екологічної і геолого-економічної оцінки та мінералогія відходів гірничо-металургійного комплексу Кривбасу: монографія / С. О. Довгий, В. В. Іванченко, М. М. Коржнев та ін. ; НАН України, Ін-т телекомунікацій і глобал. інформ. простору. – Київ: Ніка-Центр, 2013. – 228 с.

[31] Гірничий енциклопедичний словник : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. – Д. : Східний видавничий дім, 2004. – Т. 3. – 752 с. – ISBN 966-7804-78-X.

[32] Дриженко А. Ю. Відкрита розробка залізних руд України: стан і шляхи удосконалення: [монографія] / А. Ю. Дриженко, Г. В. Козенко, А. О. Рикус – Полтава: Полтавський літератор, 2009. – 452 с.

[33] Тимошенко О. О. Методичний підхід до планування витрат на природоохоронну діяльність гірничозбагачувальних комбінатів / О. О.

Тимошенко // Форум гірників : Дніпропетровськ. – Д.: ДВНЗ «НГУ», 2014. – с. 245-251.

[34] Енергозбереження та використання поновлюваних джерел енергії. Частина І: навчальний посібник для здобувачів освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Уклад.: О.П. Голик, Р.В. Жесан, І.В. Волков [та ін.]. – Кропивницький : Видавець Лисенко В.Ф., 2020 – 192 с. ISBN 978-617-7813-05-6.

[35] Шефтер Я. И. Использование энергии ветра / Шефтер Я. И. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.

[36] Харитонов В. П. Автономные ветроэлектрические установки / Харитонов В. П. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.

[37] Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев // Учебник. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2004. – 519 с.

[38] Шкрабець Ф. П. Електропостачання: навч. посіб. / Ф. П.Шкрабець; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 540 с. ISBN 978-966-350-556-5.

[39] Кривцов В.С. Ветроэлектрогенераторы / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев // Неисчерпаемая энергия: уч.: кн. Харьк. нац. аэрокосм. ун-т. Х: – С: Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. – 400 с.

[40] Радин В.И. Электрические машины. Асинхронные машины / В.И. Радин, Д.Е. Брускин, А.Е. Зорохович. – М.: Высш. шк., 1998. – 328 с.

[41] Z. Dar, K. Kar, O. Sahni, J. H. Chow, Windfarm power optimization using yaw angle control, IEEE Transactions on Sustainable Energy 8 (1) (2016) 104–116.

[42] J. Park, K. H. Law, Bayesian ascent: A data-driven optimization scheme for real-time control with application to wind farm power maximization, IEEE Transactions on Control Systems Technology 24 (5) (2016) 1655–1668.

[43] Гірничий енциклопедичний словник : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. – Д. : Східний видавничий дім, 2001. – Т. 1. – 512 с.

[44] Півняк Г. Г., Білий М. М., Бажін Г. М. Електропостачання гірничих підприємств: Довідковий посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2008. – 550 с.

[45] Электрification горных работ /Под. ред. С.А. Волотковского.– Киев: Вища школа.1980. – 448 с.

[46] Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. – Д. : Донбас, 2004. – Т. 1 : А – К. – 640 с. – ISBN 966-7804-14-3.

[47] Відновлювані джерела електричної енергії в структурах систем електропостачання залізрудних підприємств. (Аналіз, перспективи, проекти): Монографія / Сінчук О.М., Сінчук І.О., Бойко С.М., Караманиць Ф. І., Ялова О.М., Пархоменко Р.О.; Кривий Ріг: Видавництво ПП Щербатих О.В., 2017. 152 с.

[48] І. О. Сінчук, Коментар до стану електроенергетики залізрудних підприємств як сегмента їх конкурентоспроможності. Кременчук, Україна: ПП Щербатих О. В., 2018. – 166 с.

[49] World Energy Outlook –2021.

[50] H. Long, Z. Zhang, Z. Song, A. Kusiak, Formulation and analysis of grid and coordinate models for planning wind farm layouts, IEEE Access 5 (2017) 1810–1819.

[51] S. Tao, S. Kuenzel, Q. Xu, Z. Chen, Optimal micro-siting of wind turbines in an offshore wind farm using frandsen–gaussian wake model, IEEE Trans on Power Systems 34 (6) (2019) 4944–4954.

[52] Катренко Г.Н. Тенденции в распределительных электрических сетях и основные мероприятия и перспективы, которые из них вытекают / Г. Н. Катренко // Электрические сети и системы. – 2011. – № 1. – С. 4–9.

[53] Лежнюк П.Д. Розосереджені джерела електроенергії в електричних мережах / П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик, О.А. Ковальчук, В.О. Хоменко // Вісник

Чернігівського державного технологічного університету. – 2011. – № 1. – С. 104–108.

[54] Енергоефективність та відновлювані джерела енергії. Під заг. ред. Шидловського А.К. – Київ: Українські енциклопедичні знання, 2007. – 559 с.

[55] Ефимов В. В., Барабанов В. С., Шокуров М. В., Робустова Р. С., Яровая Д. А. Численное моделирование ветрового энергopotенциала Украины // Відновлювана енергетика. – 2010. – № 1. – С. 44-50.

[56] Возобновляемые источники энергии на службе человека / Б. М. Берковский, В. А. Кузьминов. – М.: Наука, 2007. – 128 с.

[57] Кармазин А.А. Анализ мирового опыта работы ветроэлектрических станций в едином режиме с энергосистемой / А.А.Кармазин, С.А.Кудря // Альтернативная энергетика и экология. – 2012 – № 7. – С. 41-47.

[58] Системы электроснабжения с источниками распределенной генерации: Монография / А.Ф. Жаркин, С.П. Денисюк, В.А. Попов; за ред. С.Е. Ноткиной; Институт электродинамики НАН Украины. – Киев: Вид. Нова думка, 2017. – 231 с.

[59] Дозоренко О. В., Сьомочкин А. Б. Особливості роботи вітроенергетичної установки з асинхронним генератором з ємнісним збудженням. Всеукраїнська науково-практична конференція «актуальні питання гірничо-металургійного виробництва»: збірник тез доповідей. / Кривий Ріг: КНУ, 2021.

[60] Копылов И.П. Электрические машины / И. П. Копылов. – М.: Логос, 2000. – 607 с.

[61] Кудря С.О., Головка В.М. Основы конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії: навч. посіб.– Київ: “НТУУ «КПІ»», 2011. –136 с.

[62] Зарубіжна практика стимулювання розвитку поновлюваних джерел енергії та їх приєднання до електромереж енергосистем: Звіт. – К.: НЕК «Укренерго»; Науково-технічний центр електроенергетики, 2012. – 75 с.

[63] Кузнєцов М.П. До визначення вітропотенціалу за даними електронної реєстрації швидкості вітру / М.П.Кузнєцов // Відновлювана енергетика XXI століття: VIII міжнар. конф., 17–21 вересня 2007 р.: тези доп. – АР Крим. – 2007. – С. 127–131.

[64] Патент UA 86427, Спосіб розташування електроенергетичної вітроустановки на відвалах кар'єрів та шахт, Кривоус А. О.; Бойко С. М.; Дяченко В. С.; Сінчук О. М. опубл. 25.12.2013.

[65] Праховник А.В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения – К. : «Освіта України», 2007. – 464 с.

[66] Кузнєцов М.П. Вплив розташування групи ВЕС на рівномірність їх сумісної роботи / М.П.Кузнєцов // Відновлювана енергетика XXI століття: XIV міжнар. конф., 16–20 вересня 2013 р.: тези доп. – АР Крим, 2013. – С. 334–339.

[67] Лежнюк П.Д. Оцінювання впливу на якість функціонування локальної електричної системи відновлюваних джерел електроенергії / П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, Д.С. Собчук // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2013. – Вип. 141– С. 8-10.

[68] B. P´erez, R. M´inguez, R. Guanche, Offshore wind farm layout optimization using mathematical programming techniques, Renewable Energy 53 (2013) 389–399.

[69] Eicke, Laima & Eicke, Anselm & Hafner, Manfred. (2022). Wind Power Generation. 10.1007/978-3-030-86884-0_10.

[70] Основные технические требования к параллельно работающим энергосистемам стран СНГ и Балтии. Методика определения величины и размещения резервов активной мощности для целей регулирования частоты и перетоков. – М.: КОТК, 2006. – 9 с.

[71] Бриль А.О. Енергетична сумісність вітроелектростанцій в складі централізованої електроенергетичної системи / [А.О.Бриль, В.П.Васько,

П.Ф.Васько и др.] // Нетрадиционная энергетика в XXI веке: III междунар. конф.: тези доп. – АР Крым, 2002. – К.: ИТТФ НАНУ, 2002. – С.113–115.

[72] Бойко, С. М. Особливості електропостачання залізорудних підприємств при впровадженні розосередженої генерації / С.М. Бойко, Борисенко, Некрасов, Городній, Касянов // Технічні науки та технології : науковий журнал / Черніг. нац. технол. ун-т. – Чернігів : ЧНТУ, 2019. – № 2 (16). – С. 118-128.

[73] Кирик В.В. Дослідження впливу джерел розподіленої генерації на режим роботи електричної системи / В.В.Кирик, О.С.Губатюк, В.І.Моссаковський. // Матеріали XIV Міжнар. конф. «Відновлювана енергетика XXI століття». – Крим, 2013. – С. 141–143.

[74] Праховник А.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий / А.В.Праховник, В.П.Розен, В.В. Дегтярев – М.: Недра, 1985 - 232 с.

[75] О. Н. Синчук, И. О. Синчук, В. С. Дяченко, С. Н. Бойко, и И. А. Минаков, «Оптимальное управление комплексом электроснабжение-электропотребление железорудных предприятий с целью повышения их электроэнергоэффективности», на XII Междунар. науч. практ. конференция «Динамика на съвременната наука – 2016», София, т. 3, с. 9-14.

[76] И. О. Синчук, А. Н. Яловая, и Н. И. Лесной, «“Холодный” резерв недогруженных силовых трансформаторов – путь повышения эффективности электроснабжения железорудных комбинатов», 36. наук. пр. КНТУ. Техніка в с.-г. вир-ві, галузеве машинобуд., автоматизація, № 25, с. 74-80, 2012.

[77] Липкин Б.Ю. Электропостачання промислових підприємств і установок. – М.: Вища школа, 1990. – 363 с.

[78] O. Sinchuk, A. Kupin, I. Sinchuk, O. Dozorenko and R. Krasnopolsky, «Algorithms Design for Fuzzy Control by Power Streams in Conditions of Underground Extraction of Iron Ore», 2020 IEEE 7th International Conference on

Energy Smart Systems (ESS), 2020, pp. 330-334, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160168.

[79] Синчук О. Н. Оптимизация энергопотребления в условиях железорудных шахт на основе применения нечеткой логики / О. Н. Синчук, А. И. Купин, И. О. Синчук, И. А. Козакевич, О. В. Дозоренко // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи : щоквартальний науково-виробничий журнал*. – Кременчук : КрНУ, 2019. – Вип. 3/2019 (47). – С. 58–65. <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.3.47.58-65>.

[80] Синчук И.О., Гузов Э.С., Яловая А.Н., Бойко С.Н.; под ред. докт. техн. наук, профессора О. Н. Синчука. Потенциал электроэнергоэффективности и пути его реализации на производствах с подземными способами добычи железорудного сырья. Монография – Кременчук: Изд. ЧП Щербатых А.В. – 2015. – 296 с.

[81] Трофимов А. В. Распределительные сети – наиболее проблемный и затратный фактор электроснабжения территорий / А. В. Трофимов, М. С. Рабинович // *Электрические сети и системы*. – 2011. – № 3. – С. 39-41.

[82] Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.

[83] Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. НПАОП 40.1-1.21-98.

[84] Дозоренко О. В., Краснопольський Р. І. Штрихи до проблеми використання повітряних потоків підземних виробок залізорудних шахт для мікроелектростанцій // *Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності підприємств ГМК : збірник наукових праць VI Міжнародної науково-технічної конференції*. – Кривий Ріг : Р. А. Козлов, 2019. – С. 100.

[85] С. М. Бойко, О. В. Дозоренко Електротехнічний комплекс електропостачання гірничих підприємств на базі вітроенергетичної станції. Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні питання гірничо-

металургійного виробництва» Збірник тез доповідей. Кривий Ріг: ДВНЗ «КНУ», 2017 С. 55.

[86] С. М. Бойко, Д. А. Михайличенко, О. В. Дозоренко Система керування вітроенергетичною станцією для електропостачання в умовах підприємств гірничо-видобувної галузі. Матеріали XIII міжнародна научна практична конференція «ключові питання в сучасній науці – 2017» Volume 11 : Технічні науки, Софія .«Бял ГРАД-БГ»,2017 С. 35-37.

[87] Дозоренко О.В. Електротехнічний комплекс електропостачання гірничих підприємств на базі вітроенергетичних установок / О.В. Дозоренко, В.С. Демків // XV Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів. Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації. 11-12 квітня 2017 р. – Кременчук, КрНУ, 2017. – с. 114.

[88] Сінчук І. О., Дозоренко О. В. Аналіз вітрового потенціалу підприємств гірничодобувної галузі криворізького залізничного басейну. Збірник праць всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Новітні технології у науковій діяльності та навчальному процесі. НУ «Чернігівська політехніка», 2021.

[89] Голубенко, Н. С. О зависимости скорости ветра от высоты с учетом рельефа местности [Электронный ресурс] / Н. С. Голубенко, С. И. Довгалюк, А. М. Фельдман, В. Б. Худик. – Режим доступа: http://wind.dp.ua/download/o_zavisimosti_skorosti_vetra_ot_vysoty_s_uchetom_r_elefa_mestnosti.doc.

[90] Баланчевадзе В. І., Барановський О. І. та ін; Під ред. А. Ф. Дзякова. Енергетика сьогодні і завтра. – М.: Вища школа, 1990. - 344 с.

[91] Ушаков К.З. Аэрология горных предприятий. / А.С. Бурчаков, Л.А. Пучков, И.И. Медведев – М.: Недра, 1987.

[92] S. Zhong, X. Wang, Decentralized model-free wind farm control via discrete adaptive filtering methods, IEEE Transactions on Smart Grid 9 (4) (2016) 2529-2540.

[93] F. Campagnolo, V. Petrovic, C. L. Bottasso, A. Croce, Wind tunnel testing of wake control strategies, in: American Control Conference, 2016.

[94] Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах : монографія / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик. – Вінниця : Вінниця : ВНТУ, 2014. – 204 с. ISBN 978-966-641-577-9.

[95] Стогний Б.С. Определение транзитных потерь мощности в фрагментированных электрических сетях областных энергоснабжающих компаний / Б. С. Стогний, В. М. Павловский // Энергетическая политика Украины. – 2004. – № 5. – С. 26-31.

[96] Лежнюк П.Д. Определение и анализ потерь мощности от транзитных перетоков в электрических сетях энергосистем методом линеаризации / П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик, А.Б. Бурыкин // Электрические сети и системы. – 2006. – № 1. – С. 28-32.

[97] Методика по визначенню втрат електроенергії у трансформаторах і лініях електропередач [Електронний ресурс]. Міністерство енергетики України від 18.02.1998 р. – Режим доступу: https://zakononline.com.ua/documents/show/142046_529265.

[98] Енергозбереження та енергетичний менеджмент у пристроях тягового електропостачання : навчальний посібник / С. П. Денисюк, В. Г. Кузнецов, В. Г. Сиченко, О. М. Крупинський; Дніпропетр. Нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2015. – 264 с. ISBN 978-966-8471-64-3.

[99] Кириленко О.В. Інтелектуальні системи керування потоками електроенергії у локальних об'єктах / О. В. Кириленко, Ю. С. Петергеря, Т. О. Терещенко, В. Я. Жуйков. – К.: Медіа ПРЕС, 2005. – 211 с.

[100] Лежнюк П. Д. Втрати потужності в електроенергетичних системах від транзитних перетікань / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін // Енергетика та електрифікація. – 2006. – № 3. – С. 26-33.

[101] W. Munters, J. Meyers, Dynamic strategies for yaw and induction control of wind farms based on large-eddy simulation and optimization, *Energies* 11 (1) (2018) 177.

[102] Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с. ISBN 978-966-999-077-8.

[103] Кузнєцов М.П. Методи прогнозування виробітку електроенергії вітровими електростанціями / М.П.Кузнєцов // Відновлювана енергетика. – 2010. – № 3. – С. 42–48.

[104] Кузнєцов Н.П. Математическое моделирование работы ветровых электростанций / Н.П.Кузнєцов // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 3. – С. 79–83.

[105] Кузнєцов Н.П. Прогнозирование производства электроэнергии ветровыми электростанциями / Н.П.Кузнєцов // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 8. – С.54–58.

[106] С. М. Бойко, І. О. Сінчук, А. П. Сінолиций, Є. О. Несмашний, О. В. Дозоренко. Особливості прогнозування рівнів енергоспоживання в умовах розподільчих електричних мереж залізорудних підприємств / Гірничий вісник : науково-технічний збірник. – Кривий Ріг, 2019. – Вип. 105. – С. 24–29. <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2019-1-105-24-29>.

[107] Сінчук О. М., Сінчук І. О., Дозоренко О. В. Діагностика та прогнозування рівнів електроспоживання залізорудних копалень. Мікросистеми, електроніка та акустика. Національний технічний університет України «КПІ». 2019. Том. 24, №2(109). С. 25–32. <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2019.24.2.169731>.

[108] Akpinar S. Estimation of wind energy potential using finite mixture distribution models / S.Akpinar, E.Akpinar // *Energy Conversion and Management*. – 2009. – N. 50. – P. 877–884.

[109] Патент UA 86427. Кривоус А. О., Бойко С. М., Дяченко В. С., Сінчук О. М. Спосіб розташування електроенергетичної вітроустановки на відвалах кар'єрів та шахт. Опубл.: 25.12.2013.

[110] Yu P. A new method for balancing the fluctuation of wind power by a hybrid energy storage system / [P.Yu, W.Zhou, Y.Zhao and oth.] // Information Technology Journal. – 2012. – Vol.11(1). – P. 58–66.

[111] Сінчук О.М. Система автоматичного регулювання електропостачання підприємств гірничо-видобувного комплексу на базі вітроенергетичних комплексів / Сінчук О.М., Бойко, С. М. Михайличенко Д.А // Енергетика: економіка, технології, екологія Науковий журнал № 4 (42) НТУУ «КПІ» - 2015 с. 30-34.

[112] О. М. Сінчук Алгоритм вибору нетрадиційних та відновлювальних джерел електричної енергії до локальної системи електропостачання підприємств гірничо-видобувного комплексу / О. М. Сінчук , І. О. Сінчук, Бойко, С. М., І. А. Мінаков // Electronics and Communications, Volume 21, №4(93),2016 с. 6-12.

[113] Сінчук І. О. Особливості функціонування локальних електротехнічних систем на базі вітрових мініелектростанцій в умовах підприємств гірничодобувної галузі / І. О. Сінчук, Бойко, С. М., С. В. Вирвикишка // Вісник Вінницького політехнічного інституту № 5 (128), 2016 – С. 45-51.

[114] Бойко, С. М. До проблеми формування джерел розосередженої генерації в умовах залізрудних підприємств / С.М. Бойко Носач І В Кирюхина М В Хебда А С// Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського: науковий журнал. Серія: Технічні науки. – Київ: Том 29 (68). № 4, 2018, Частина 2. – Київ, 2018. - С.31-35.

[115] О.М. Сінчук. До питання проєктування вітроенергетичних станцій в умовах гірничорудних підприємств / О.М. Сінчук, С.М. Бойко, А.В.

Некрасов, М.О. Ножнова, М. М. Федь // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2020 – Том 31 (70) № 3. – С. 153-157.

[116] О.М. Сінчук Аналіз факторів впливу на основні енергетичні характеристики вітроенергетичних станцій, що експлуатуються в умовах гірничорудних підприємств / О.М. Сінчук, С.М. Бойко, А.В. Некрасов, М.О. Ножнова, А.О. Онищенко // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2020 – Том 31 (70) № 2. – С. 256-261.

[117] Сінчук О.М., Сергієнко С.А., Бойко С.М., Система автономного електропостачання споживачів, що працює на відновлювальних джерелах енергії Патент № 93101 Україна, МПК H02P 31/00, H02J 9/00, H02J 5/00 №u201314955; заявл. 20.12.2013; опубл. 25.09.2014. Бюл. № 18. – 8 с.

[118] M. Lyu et al., "Analysis and Design of PI Plus Repetitive Control for Grid-Side Converters of Direct-Drive Wind Power Systems Considering the Effect of Hardware Sampling Circuits," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 87947-87959, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993041.

[119] Bitar, E., & Seiler, P.J. (2013). Coordinated control of a wind turbine array for power maximization. *2013 American Control Conference*, 2898-2904.

[120] Munters, W.; Meyers, J. Effect of wind turbine response time on optimal dynamic induction control of wind farms. *J. Phys. Conf. Ser.* 2016, 753, 052007.

[121] Ilaerts, D.; Meyers, J. Boundary-layer development and gravity waves in conventionally neutral wind farms. *J. Fluid Mech.* 2017, 814, 95–130.

[122] О. Сінчук, С. Бойко, О. Дозоренко, та В. Демків. Пристрій для електротехнічного комплексу електропостачання підприємства з вітроенергетичними установками: пат. 121291 Україна : H02J 3/38 (2006.01), H02J 9/04 (2006.01). № u 2017 06756 ; заявл. 29.06.2017 ; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22. 4 с.

[123] Сьомочкин А. Б. До форматизації варіантів керування вітроелектричною установкою / А. Б. Сьомочкин, О. В. Дозоренко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи : щоквартальний науково-

виробничий журнал. – Кременчук : КрНУ, 2022. – Вип. 1/2022 (57). – С. 46-54.
<https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.1.57.46-54>.

[124] Park, J.; Kwon, S.D.; Law, K. A Data-Driven, Cooperative Approach for Wind Farm Control: A Wind Tunnel Experimentation. *Energies* 2017, *10*, 852.

[125] Daneshi, H., A.K. Srivastava and A. Daneshi, 2010. Generation scheduling with integration of wind power and compressed air energy storage. Proceedings of the Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 19-22, New Orleans, LA., USA., pp: 1-6.

[126] M. Bastankhah and F. Porté-Agel, “A new analytical model for wind-turbine wakes,” *Renew. Energy*, vol. 70, pp. 116-123, 2014.

[127] X. X. Gao, H. X. Yang, and L. Lu, “Optimization of wind turbine layout position in a wind farm using a newly-developed two-dimensional wake model,” *Appl. Energy*, vol. 174, pp. 192-200, 2016.

[128] Григораш, О.В. Современное состояние и перспективы применения асинхронных генераторов в автономной энергетике/ О.В. Григораш. -Промышленная энергетика. 1995. - № 3. – 29–32.

[129] Жежеленко, И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко. М.: Энергоатомиздат. – 1986. – 364 с.

[130] Володарський Є.Т. Система моніторингу якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання / Є.Т. Володарський, А.В. Волошко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – №. 318 (69). – С. 10–18.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А
ОГЛЯД СТАНУ ВІТРОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ

Вітроенергетика на сьогоднішній день є найбільш швидкозростаючою галуззю серед альтернативних джерел енергії. За останні двадцять п'ять років ця область перетворилася з екзотичного явища в напрямок який стрімко розвивається, де розроблені більш ефективні і надійні технології, вартість яких за десять років знизилася майже вдвічі, що дозволило налагодити їх комерційне виробництво.

Відповідно до «Звіту про глобальний статус відновлювальних джерел енергії 2020», станом на кінець 2019 р. частка відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) у загальній структурі виробництва електроенергії складала близько 27,3 %. В свою чергу, вітроенергетика займала значну частину ВДЕ – 5,9 % (рис. А.1).

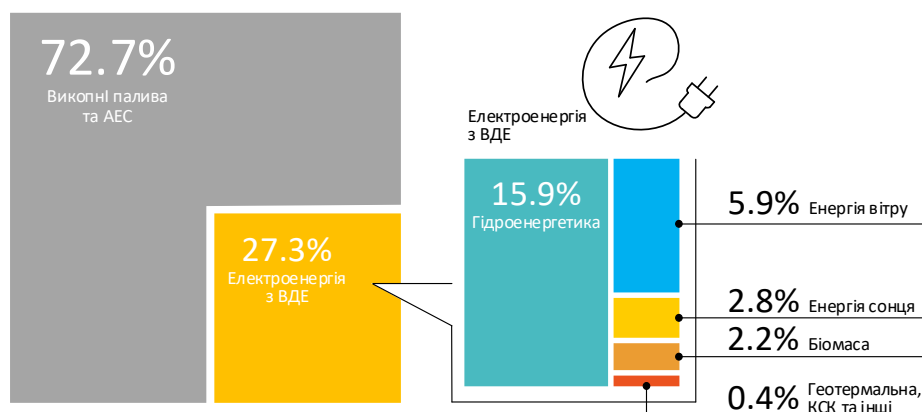


Рисунок А.1 – Структура виробництва електроенергії в світі, 2019 р.

На рис. А.2 зображено динаміку розвитку джерел енергії в країнах ЄС, з якого видно, що з усіх джерел зростаючу динаміку мають енергії сонця та вітру. Як бачимо, темпи зростання сонячної енергетики сягають 5-8 % щороку. В свою чергу, темпи приросту сумарної потужності вітроенергетики протягом останніх років сягають 15 %, а до 2035 р. мають вийти на показник 30 % приросту, що говорить актуальність та пріоритет розвитку саме вітроенергетики.

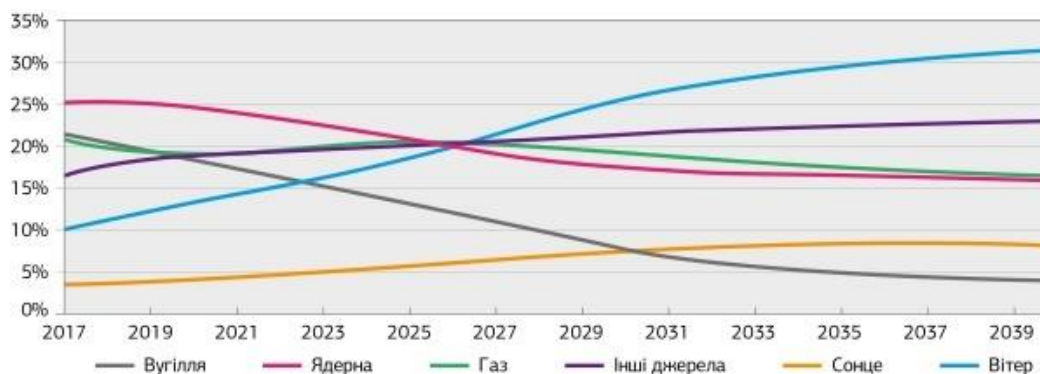


Рисунок А.2 – Розвиток джерел енергії в країнах ЄС до 2040 року

На сучасних ВЕС в Данії вартість одного кіловата енергії можна порівняти з електростанцією, що працює на вугіллі, і нижча, ніж на ЕС, що працює на нафті.

У жовтні 2017 року 24 % всієї електроенергії ЄС складала електроенергія від ВЕС. Більша частина електроенергії – 88,7 % надійшла від наземних ВЕС, ще 11,3 % енергії надійшло від електростанцій у морі. Потужність наземних європейських ВЕС складає 141,1 ГВт, морських – 12,6 ГВт. Данія отримала 109 % енергії від ВЕС (тобто більше, ніж завжди), Німеччина – 61 %, Португалія – 44 %, а Ірландія – 34 %. Із 28 країн ЄС 10 отримали більше 20 % необхідної електроенергії від вітру. За 2016 рік у ЄС підключили до енергосистем 338 нових турбін.

У 2019 році більше половини відновлюваної енергії в США було отримано від вітряних електростанцій. У процентному відношенні вони обійшли ГЕС.

Дві найбільші у світі ВЕС знаходяться в Європі. Найбільша за кількістю турбін – 150 турбін є шельфова електростанція Gemini в Нідерландах, проте найбільша за потужністю – London Array (630 МВт проти 600 у Gemini). На 2020 рік найбільшою ВЕС стане британська Hornsea Project Two, потужність котрої складе 1,8 ГВт і яка є продовження проекту Hornsea Project One потужністю 1,2 ГВт.

Однак ВЕС встановлюють не тільки на суші, але й у морі. Неподалік від острова Уолні на північному заході Англії, а саме – в Ірландському морі, встановили найбільшу вітряну електростанцію у світі. Потенційно, енергія цієї станції може живити електрикою до 600 тис. британських осель. Турбіни для проекту надали компанії MHI Vestas 8MW та Siemens Gamesa 7MW. Їхня висота варіюється від 188 м до 195 м, а загальна площа станції становить 142 км².

У 2020 році встановлена загальна світова потужність вітрової енергетики становила близько 743 ГВт, з яких 98,5 % було встановлено в прибережній зоні (рис. А.3). По країнах трійку лідерів за встановленими потужностями берегових вітростанцій за той же період представляли Німеччина, США і Іспанія. В Азії та Тихоокеанському регіоні берегова вітрова енергетика найбільш швидкими темпами росла в Китаї, де встановлена потужність зросла приблизно в 1,3 рази.

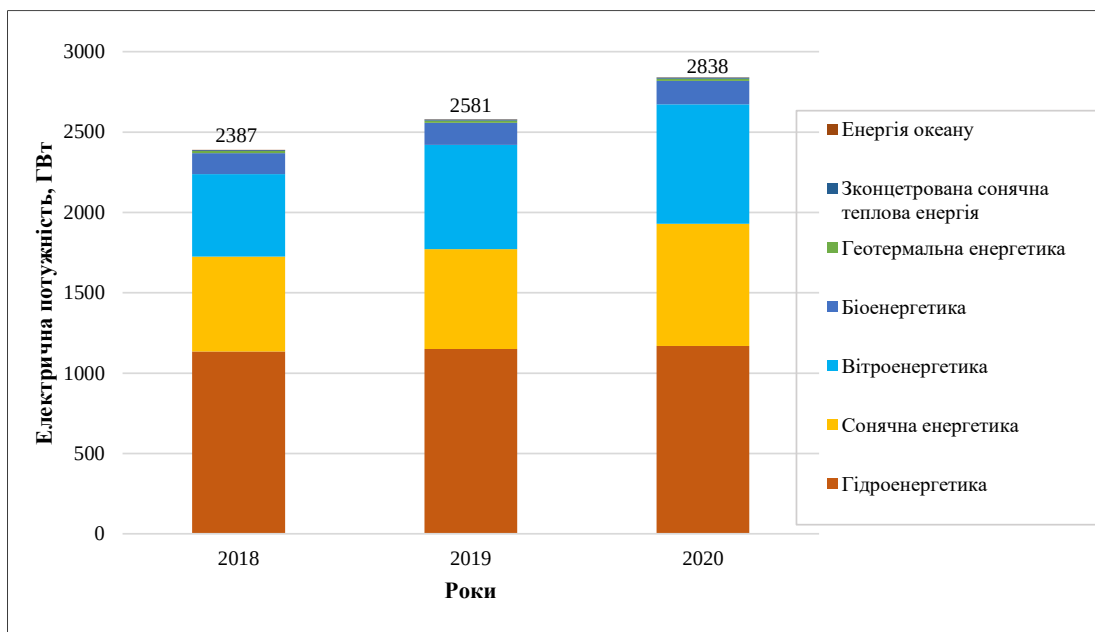


Рисунок А.3 – Встановлена електрична потужність ВДЕ в світі

Сучасна вітрова турбіна здатна виробляти електрики в 180 разів більше, ніж 20 років тому, а вартість обладнання на одиницю продукції (кВт·год) за ці роки впала більш ніж удвічі.

Якщо в 2010 році обсяг інвестицій в розвиток вітрової енергетики становив приблизно 765 доларів на 1 кВт, а, отже, 3,6 центів за 1 кВт·год. Тоді в 2020 році обсяг вкладень знизиться до 550 дол. США на 1 кВт, і тоді вартість електрики становитиме 2,6 центів за 1 кВт·год.

Згідно з даними Міжнародного енергетичного агентства, витрати на установку вітрових електростанцій становить в середньому 1250 доларів США за кВт, таким чином, у порівнянні з двадцятирічною давністю вартість вітрової енергії знизилася з 0,8 доларів США за кВт·год до 0,04. Завдяки технологіям які швидко розвиваються і підвищенню продуктивності загальна вартість вітрової енергії продовжує знижуватися.

Більше того, формування вітрової енергетики як самостійної галузі позитивним чином позначається на економічному розвитку сучасного суспільства. Рада з вітрової енергії оцінила рівень зайнятості в секторі вітрової енергетики в обсязі приблизно 350 000 чоловік.

З 2012 року потужність енергії, що виробляється вітром, стабільно збільшується в середньому на чверть. Це зростання обґрунтовано, переважно, тим, що в таких великих державах, як США, Іспанія та Китай, де ринок вітрової енергії вже сформувався, вводяться нові додаткові потужності. Але все ж таки лідируючі позиції на ринку вітрової енергії за сукупною встановленою потужністю на сьогоднішній день займає Європа.

В області проведення наукових досліджень і вдосконалення технологій лідируючі позиції також займають ряд держав Європи та Північна Америка. Однак останнім часом в цьому напрямку активно працюють такі країни, що розвиваються, як Китай, Індія і Бразилія. Варто зауважити, що на азіатському ринку вітрової енергетики на сьогоднішній день спостерігається тенденція до стрімкого зростання, чому сприяють проведення постійних досліджень і державна підтримка.

Найбільш придатними місцями для виробництва енергії з вітру вважаються прибережні зони, тому офшорні (морські) вітряні електростанції

на сьогоднішній день можна назвати перспективною галуззю вітроенергетики. Зараз цей напрямок в основному розвивається в Європі і США. Проте, морський вітер володіє значним енергетичним потенціалом, що вимагає динамічного розвитку відповідних технологій. Останнім часом в даному напрямку спостерігається істотний прогрес, розроблені проекти великомасштабних вітростанцій, які зможуть працювати в морях і океанах.

В силу своєї специфіки встановлення вітрових турбін в море виявилася дорожчим, ніж аналогічні побудови на суші. 1 кВт·год, вироблений, наприклад, європейськими морськими вітровими станціями коштує від 0,08 до 0,15 доларів, що вдвічі перевищує номінальну вартість енергії, отриманої береговими вітряними спорудами.

Європа ось уже на протязі декількох років є постійним лідером на ринку вітроенергетики, не дивлячись на те, що її частка з кожним роком знижується за рахунок розвитку даного напрямку на інших континентах.

Щорічно потужність енергії, отриманої з вітру, в Європі збільшується на 30%, а ринок відповідного обладнання – на 25%.

На сьогоднішній день вітряна енергія використовується в 27 країнах Європи. Вітроенергетика найбільш розвинена в Німеччині, за нею йде Іспанія і Данія. Такі країни, як Чеська Республіка, Фінляндія, Україна, Болгарія, Угорщина, Естонія, Литва, Люксембург, Латвія, Румунія, Словаччина, Кіпр, Мальта та Словенія всі разом складають 1% від загальної встановленої потужності.

Америка стала однією з перших держав, хто почав використовувати вітер як джерело енергії, в свою чергу азіатський континент стає одним з основних центрів розвитку вітроенергетики, де найпотужнішим ринком залишається Індія.

Процес будівництва української вітроенергетики розпочався у 1996 році, коли була спроектована Новоазовська ВЕС проектною потужністю 50 МВт. У 1997 році запрацювала Трускавецька ВЕС. У 2000 році в Україні працювало

вже 134 турбіни та закладено близько 100 фундаментів під турбіни потужністю 100 кВт. У 1998–1999 роках стали до ладу три нові ВЕС.

Значне, зростання будівництва вітроелектростанцій спостерігається з 2009 року, після запровадження Урядом України «Зеленого тарифу». На кінець 2012 року сумарна потужність вітроелектростанцій в Україні становила близько 263 МВт, які протягом 2012 року виробили 288,2 млн кВт·год електроенергії, що в 3,2 рази більше, ніж у попередньому році (89,5 млн кВт·год).

За 2015 рік в Україні було введено в експлуатацію 16,6 МВт вітрогенеруючих потужностей. За підсумками цього періоду вітроенергетичні установки на материковій частині країни виробили 1125 млн кВт·год електроенергії. Таким чином, частка виробленої ВЕС енергії становила 0,73% від загальнорічного обсягу генерації електрики в Україні, або 0,8% від усіх електростанцій материкової частини країни, повідомляється в прес-релізі Української вітроенергетичної асоціації (УВЕА).

«Чиста» електроенергія, вироблена за рахунок енергії вітру і поставлена в національну електромережу, дозволила скоротити викиди вуглекислого газу в атмосферу більш ніж на 1 млн 329 тис тонн і забезпечила в еквіваленті понад 2,8 млн домашніх господарств при середньому їх споживанні 400 кВт·год в місяць або 4,5 млн сімей, що живуть в багатоквартирних будинках із середнім місячним споживанням електроенергії 250 кВт·год.

Станом на 2020 рік сумарна потужність ВЕС материкової частини України склала 1111,2 МВт (рис. А.4, табл. А.1). Всі ВЕС підключені до енергомережі.



Рисунок А.4 – Структура виробництва електроенергії в Україні у 2020 році

У 2020 році частка ВЕС та СЕС у структурі виробництва електроенергії зросла вдвічі – до 6,8% (3,3 % у 2019 р.) при загальному обсязі виробництва електроенергії 148,9 млрд кВт·год. Встановлена потужність цих ВДЕ протягом року збільшилася на 1,9 ГВт (+41 % у порівнянні з 2019 р.) (табл. А.1).

Таблиця А.1 – Динаміка обсягів встановленої потужності та частка в загальному виробництві ЕЕ ВЕС та СЕС

	Встановлена потужність, МВт (%)			Обсяги та частка у загальному виробництві, млрд кВт·год (%)		
	2019	2020	Δ	2019	2020	Δ
<i>СЕС</i>	3555,4	5362,6	+1807,2 (+50,8%)	3,1	6,8	+3,7 (4,6%)
<i>ВЕС</i>	1025,0	1111,2	+86,2 (+8,4%)	2,0	3,3	+1,3 (2,2%)
<i>Разом</i>	4580,4	6473,8	+1893,4 (+41%)	5,1	10,1	+5 (6,8%)



Рис. А.5 – Розвиток ВДЕ в Україні до 2035 року. Стан і перспективи

На території тимчасово окупованого Криму встановлена вітроенергетична потужність залишилася без змін – 87,8 МВт. Постачання електроенергії ВЕС, які розташовані на тимчасово окупованій території АР Крим, до Об'єднаної енергетичної системи України припинено з квітня 2014 року.

Пріоритетним напрямком наукових досліджень України є створення вітроенергоустановок з можливістю низького розташування генератора і вертикальною позицією вітроприймаючих елементів. Завдяки цьому вдалося досягти примітивізації конструктивної схеми. Вітроенергетична установка зручна в монтажі і легка в експлуатації. Істотним плюсом даної установки є допустимість роботи від вітрових течій різного спрямування. Як наслідок з цього відпадає необхідність дослідити напрямок вітрового потоку при установці і експлуатації.

Україна повністю забезпечена усіма матеріалами для виготовлення вітрових електростанцій усього діапазону потужностей, що застосовуються на практиці – від мікротурбін, використовуваних для зарядки акумуляторів яхт і пунктів радіотелефонного зв'язку, систем обслуговування нафто-, газопроводів, автомобільних доріг, живлення об'єктів сільського господарства і прикордонних застав, до потужних вітроагрегатів, які

постачають електроенергію в енергосистеми для покриття існуючого дефіциту і заміщення енергії, що виробляється тепловими електростанціями.

Інститут відновлюваної енергетики НАН України розробив і виготовив ряд зразків установок з покращеними властивостями і системою буремного захисту. Розроблені в інституті чотири вітротурбіни ФЛ 2500-100 одиничною потужністю 2,5 МВт були введені в експлуатацію на площадці Очаківського вітропарку в Миколаївській області, і дві турбіни Vestas V-112 одиничною потужністю 3,3 МВт – на ВЕС «Старий Самбір-1» в Львівській області. Запропонована нова система буремного захисту, принципово відрізняється від зарубіжних аналогів, яка заснована на використанні чинного перекидного моменту на вітроколесо, утвореного за рахунок різниці в швидкостях повітряного потоку у верхній і нижній частинах вітроколеса. Це істотно збільшує як ефективність роботи системи буремного захисту і підвищує стійкість вітрових установок проти перекидання, так і надійність їх роботи і термін служби в цілому.

Розроблено принципово нові вертикально-осьові вітрові турбіни модульного виконання і спеціальний електрогенератор для них, проведені теоретичні опрацювання турбін і генераторів, виготовлений ряд дослідних зразків, що показали перспективність даного напрямку.

ДОДАТОК Б
ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ

Вітер у приземному шарі утворюється внаслідок нерівномірного нагрівання земної поверхні Сонцем. Оскільки поверхня Землі неоднорідна, то навіть на одній і тій же широті суша і водні простори, гори і лісові масиви, пустелі і болотисті низини нагріваються по-різному. Протягом дня над морями і океанами повітря залишається порівняно холодним, оскільки значна частина енергії сонячного випромінювання витрачається на випаровування води або поглинається нею. Над сушею повітря прогрівається більше, розширюється, знижує свою щільність і спрямовується в більш високі шари над землею. Його заміщають більш холодні, а отже, більш щільні повітряні маси, що розташовувалися над водними просторами, що і призводить до виникнення вітру, як спрямованому переміщенню великих мас повітря. Таким чином, повітряні маси увесь час переміщуються і переміщуються як у вертикальному напрямку, так і паралельно земній поверхні. Ці переміщення мають дуже складний характер і залежать від багатьох причин.

Зі збільшенням висоти швидкість вітру в середньому зростає, й на висоті 500 м вона майже вдвічі вища, ніж у землі. Сила і напрям вітру в різних зонах по-різному змінюються залежно від висоти над поверхнею Землі. Так, на екваторі близько до земної поверхні розташована зона з відносно невеликими і змінними за напрямом швидкостями вітру, а у верхніх шарах виникають досить великі за швидкістю повітряні потоки в східному напрямку. На висоті від 1 до 4 км від поверхні Землі, в зоні між 30° північної і південної широтою утворюються досить рівномірні повітряні течії. У північній півкулі ближче до поверхні Землі їх серед.

Таким чином, теплова енергія, що безперервно надходить від Сонця, перетворюється в кінетичну енергію руху в атмосфері великих мас повітря, циркуляція яких і називається вітром. Вітер – величина векторна, яка характеризується двома основними елементами: напрямком, в якому переміщується повітря, і швидкістю, з якою відбувається це переміщення. Напрямок вітру на практиці прийнято позначати тією частиною горизонту,

відкіля він дує. Таким чином, вітер, при якому повітря переміщається з півдня на північ, буде південним.

Швидкість його зазвичай визначають у метрах на секунду, а у судноплавстві у вузлах.

Зі швидкістю вітру нерозривно зв'язане поняття швидкості вітру:

- 2...3 м/с – слабкий (ледь відчувається);
- 4...7 м/с – помірний (хитаються тонкі гілки дерев);
- 10... 12 м/с – сильний (хитаються товсті гілки дерев);
- 15...20 м/с – буря;
- 20.. 30 м/с – шторм;
- більше 30 м/с – ураган, швидкість становить 7-9 м/с.

Вітровий потік, зустрічаючи при русі на своєму шляху лопаті, віддає свою енергію вітроколесу. Внаслідок наявності аеродинамічних втрат вітроколесо використовує тільки частину потужності вітрового потоку. При цьому, в результаті безперервної зміни миттєвих швидкостей вітру в значних межах змінюється енергія вітрового потоку, а отже, потужність, що розвивається вітроколесом. Структура вітрового потоку за спостережуваний проміжок часу характеризується рядом величин: середньою швидкістю вітру; поривчастістю вітру; мінливістю вітру; тривалістю провалів-підйомів швидкостей вітру вище або нижче середнього значення.

Енергетичні установки зазвичай використовують вітер у приземному шарі на висоті до 50...70 м, рідше – до 100...150 м від поверхні Землі, тому найбільший інтерес представляють характеристики руху повітряних потоків саме в цьому шарі. Найважливішою характеристикою, що визначає енергетичну цінність вітру, є його швидкість. В силу ряду метеорологічних чинників (збурення атмосфери, зміни сонячної активності, кількості теплової енергії, що поступає на Землю, і інших причин), а також внаслідок впливу рельєфних умов, безперервна тривалість вітру в даній місцевості, його швидкість і напрямок змінюються за випадковим законом. Тому потужність,

яку може виробляти вітроустановка в різні періоди часу, вдається передбачати з дуже малою ймовірністю. У той же час сумарне вироблення агрегату, особливо за тривалий проміжок часу, можна розрахувати з високим рівнем достовірності, так як середня швидкість вітру і частота розподілу швидкостей протягом року або сезону змінюються незначно.

Миттєва швидкість вітру часто визначає динамічний вплив повітряного потоку на вітродвигун. Динамічні характеристики потоку, його пориви впливають на роботу автоматичних систем регулювання й орієнтації. Кількість енергії, яку може виробити вітроагрегат, залежить в першу чергу від усередненої швидкості вітру за певний інтервал часу і по всьому перерізу потоку, що дорівнює площі поверхні, обмахувану вітроколесом. Саме ця швидкість в основному визначає також режими роботи агрегату.

В аеронавтиці, повітряний слой висотою до 100 м називається приземним слоєм. Це найнепередбачуваніший і найважчий в плані визначення повітряних потоків слой і в той же час найвикористовуваніший вітроенергетикою. Але однієї висоти для правильної установки ВЕУ недостатньо.

Як і всяке рухоме тіло, вітер володіє певним запасом кінетичної енергії, і яка може бути перетворена в механічну роботу або електричну енергію за допомогою спеціальних пристроїв і установок, що одержали назву вітряних. Швидкість вітру є найважливішою характеристикою технічних властивостей вітру. Кінетична енергія вітрового потоку E , як всякого тіла, що рухається зі швидкістю v і має масу m , дорівнює:

$$E_{\text{кін}} = \frac{mv^2}{2} \quad (\text{Б.1})$$

У свою чергу маса повітря в перерізі перед вітроагрегатом є масовою витратою повітря, що могло би пройти через обмахувану площу S вітроколеса за одиницю часу, маючи щільність ρ :

$$m = \rho v A \quad (\text{Б.2})$$

де $\rho = \frac{\gamma}{g}$ – масова щільність повітря; γ – питома вага повітря; g – прискорення сили тяжіння; A – площа, через яку протікає вітровий потік; v – швидкість вітру.

Обмахувана площа вітроколеса – це геометрична проекція площі вітроколеса на площину, перпендикулярну вектору швидкості вітру. У разі перпендикулярності вектора швидкості вітру до обмахуваної площі S , її величина визначається за формулами:

– для горизонтально-осьового вітродвигуна:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (\text{Б.3})$$

– для вертикально-осьового вітродвигуна:

$$A = D \cdot H \quad (\text{Б.4})$$

Розглянемо трубку потоку повітря радіусом R , зі швидкістю потоку V і визначимо масу повітря, що проходить через перетин трубки в одиницю часу:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot dl = \rho \cdot A \cdot v \cdot \Delta t = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v \cdot \Delta t, \quad (\text{Б.5})$$

де ρ – питома щільність (вага) повітря, кг/м^3 ; V – об'єм, який займає повітря, м^3 ; A та R – відповідно площа і радіус трубки потоку повітря, м^2 , м ; dl – елемент довжини потоку, який долається за час Δt .

Отже отримаємо рівняння для визначення кінетичної енергії повітряного потоку (вітру) та його потужності:

$$E_{\text{кін}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \cdot t \quad (\text{Б.6})$$

Перш ніж кінетична енергія вітру буде перетворена в електричну енергію, необхідно спочатку здійснити перетворення енергії вітру в механічну енергію. Таке перетворення відбувається на підставі основних законів аеродинаміки.

Першим основним законом аеродинаміки є закон обертання руху, згідно з яким результати розгляду не змінюються від того, чи вивчати взаємодію

нерухомого тіла з оточуючим його середовищем, що рухається, або, навпаки, рух тіла в нерухомому середовищі з тією ж відносною швидкістю.

Другий закон виражає постійність маси, що дозволяє визначати швидкості повітря (рідини) в різних перерізах замкнутого (обмеженого) простору. Обчислюється він рівнянням нерозривності:

$$m = \rho \cdot A \cdot v = \text{const}, \quad (\text{Б.7})$$

де ρ – щільність; A – площа; v – швидкість.

Третій закон – закон збереження енергії, записується у вигляді рівняння Бернуллі:

$$P_0 = P + \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (\text{Б.8})$$

де P_0 – повний тиск; P – статичний тиск.

Перетворення кінетичної енергії вітру в механічну енергію в вітрогенераторних установках може здійснюватися на основі двох принципів:

- принципу використання сили опору (перетворення плоскими поверхнями-пластинами);
- принципу використання підйомної сили (перетворення аеродинамічними профілями).

Вітроколесо може перетворювати в корисну роботу тільки частину енергії, яка оцінюється коефіцієнтом використання енергії вітру ξ . Для ідеального крильчатого вітроколеса максимально досягаюча величина ξ , розрахована за класичною теорією Жуковського Н. Е. рівна $\xi = 0,593$.

Сучасні вітродвигуни перетворюють в механічну енергію не більше 45-48% кінетичної енергії вітрового потоку. Тому теоретична максимальна потужність вітроустановки не перевищує:

$$W_e = \frac{\xi \cdot \rho \cdot v^3 \cdot F}{2} \quad (\text{Б.9})$$

Постійні зміни швидкості вітру призводять до того, що потужність, яка розвивається двигуном, змінюється в дуже великих межах від нуля під час

штилю, в десятки раз перевищуючу встановлену потужність при шквальних поривах вітру.

В теперішній час найбільш досконалими є крильчаті вітродвигуни з горизонтальною вісю обертання вітроколеса.

Синхронні, асинхронні, з постійними магнітами, індукторні машини – знаходять широке застосування в якості генераторів у вітроустановках. Перспективу мають також і генератори торцевого виконання, в яких статор і ротор виконуються у формі дисків і в яких перетворення енергії здійснюється в повітряному проміжку між цими дисками.

Асинхронною машиною називають безколекторну машину змінного струму, в якій відношення частоти обертання ротора до частоти струму в мережі, до якої машина підключена, залежить від навантаження. Розрізняють два типи асинхронних машин: 1) безколекторні; 2) колекторні.

Асинхронні машини порівняно прості за конструкцією, дуже надійні в експлуатації, мають досить високі енергетичні показники і невисоку вартість. Значний інтерес останніми роками викликає застосування асинхронних машин в генераторному режимі для забезпечення живленням, як споживачів трифазного струму, так і споживачів постійного струму через випрямні пристрої. У певних умовах експлуатації автономних джерел електроенергії застосування асинхронних генераторів (АГ) виявляється переважним. АГ відрізняються простотою експлуатації і обслуговування, легко включаються на паралельну роботу, а форма кривої вихідної напруги у них ближче до синусоїдальної, чим у СГ при роботі на одне і те ж навантаження. Крім того, маса АГ потужністю до 100 кВт приблизно в 1,3...1,5 рази менше маси СГ такої ж потужності і вони несуть менший об'єм обмотувальних матеріалів. При цьому в конструктивному відношенні вони нічим не відрізняються від звичайних АД і можливе їх серійне виробництво на заводах електромашинобудування, що випускають асинхронні машини.

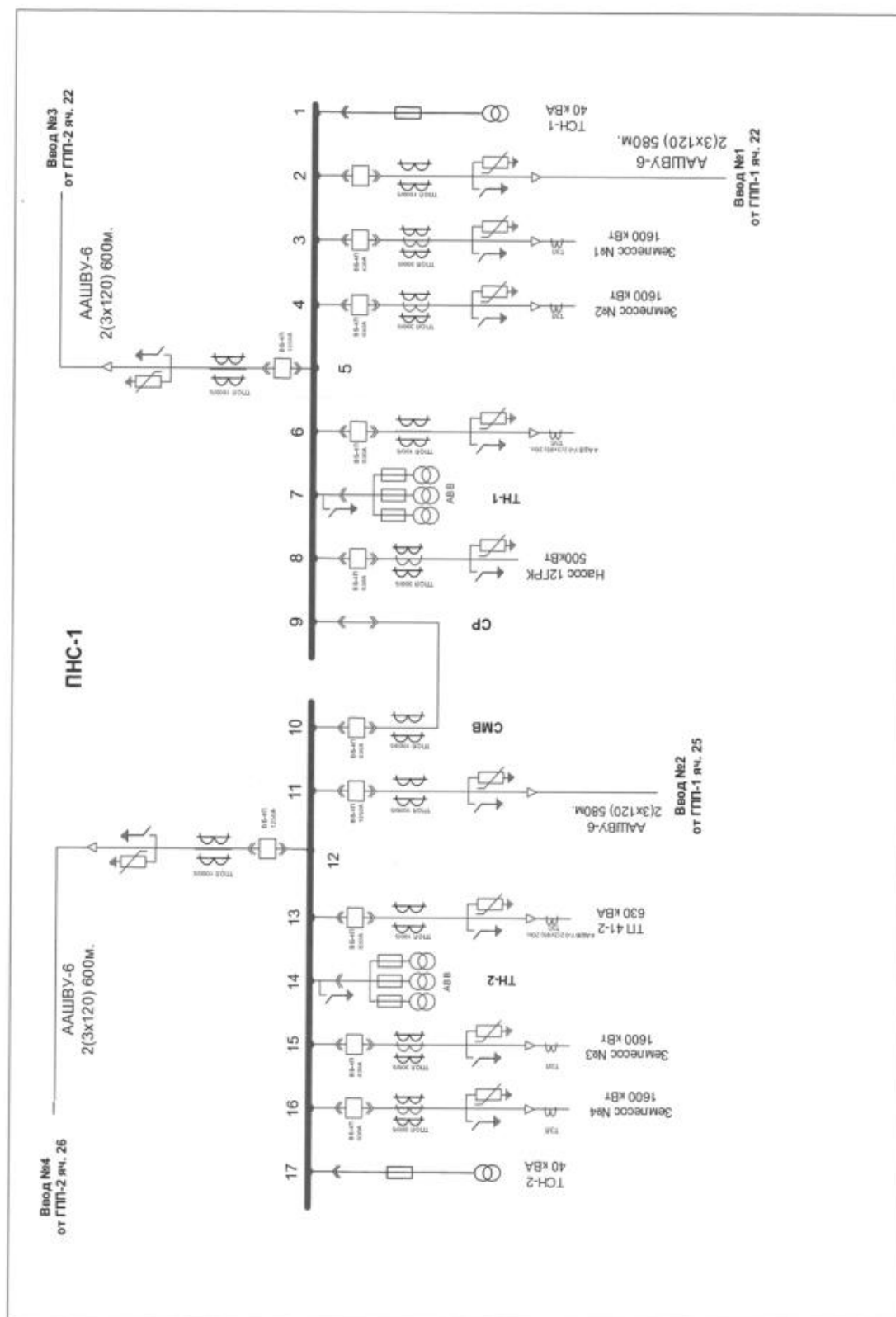
Один з недоліків асинхронних машин – це те, що вони є споживачами значної реактивної потужності (50% і більше від повної потужності), необхідної для створення магнітного поля в машині, яка повинна поступати з мережі при паралельній роботі АГ з мережею або від іншого джерела реактивної потужності (батарея конденсаторів або синхронний компенсатор при автономній роботі АГ).

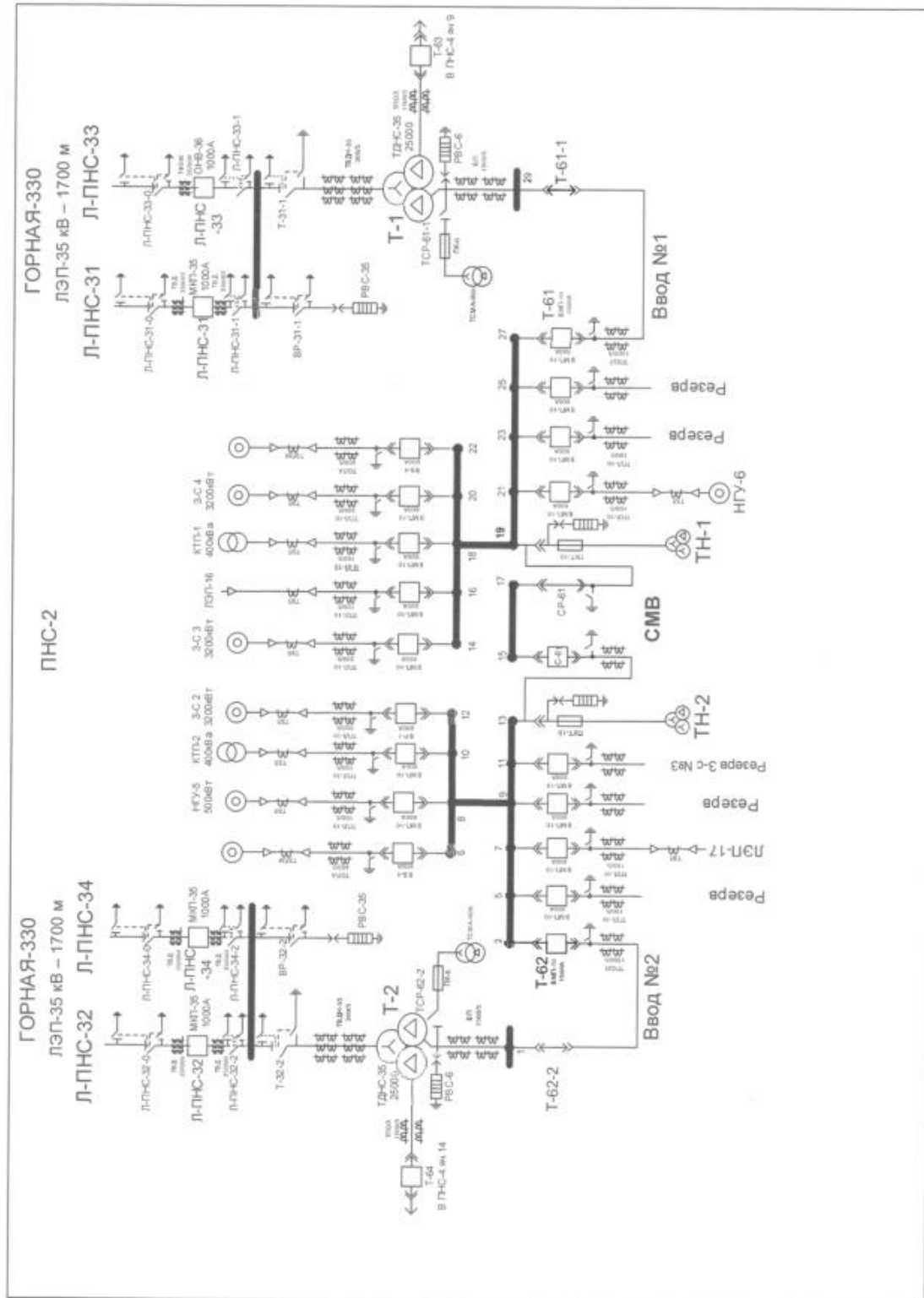
Для поліпшення експлуатаційних властивостей АГ в коло статора додатково можуть включатися конденсатори послідовно або паралельно з навантаженням. У усіх випадках автономної роботи АГ джерела реактивної потужності повинні забезпечувати реактивною потужністю як АГ, так і навантаження, що має, як правило, реактивну (індуктивну) складову.

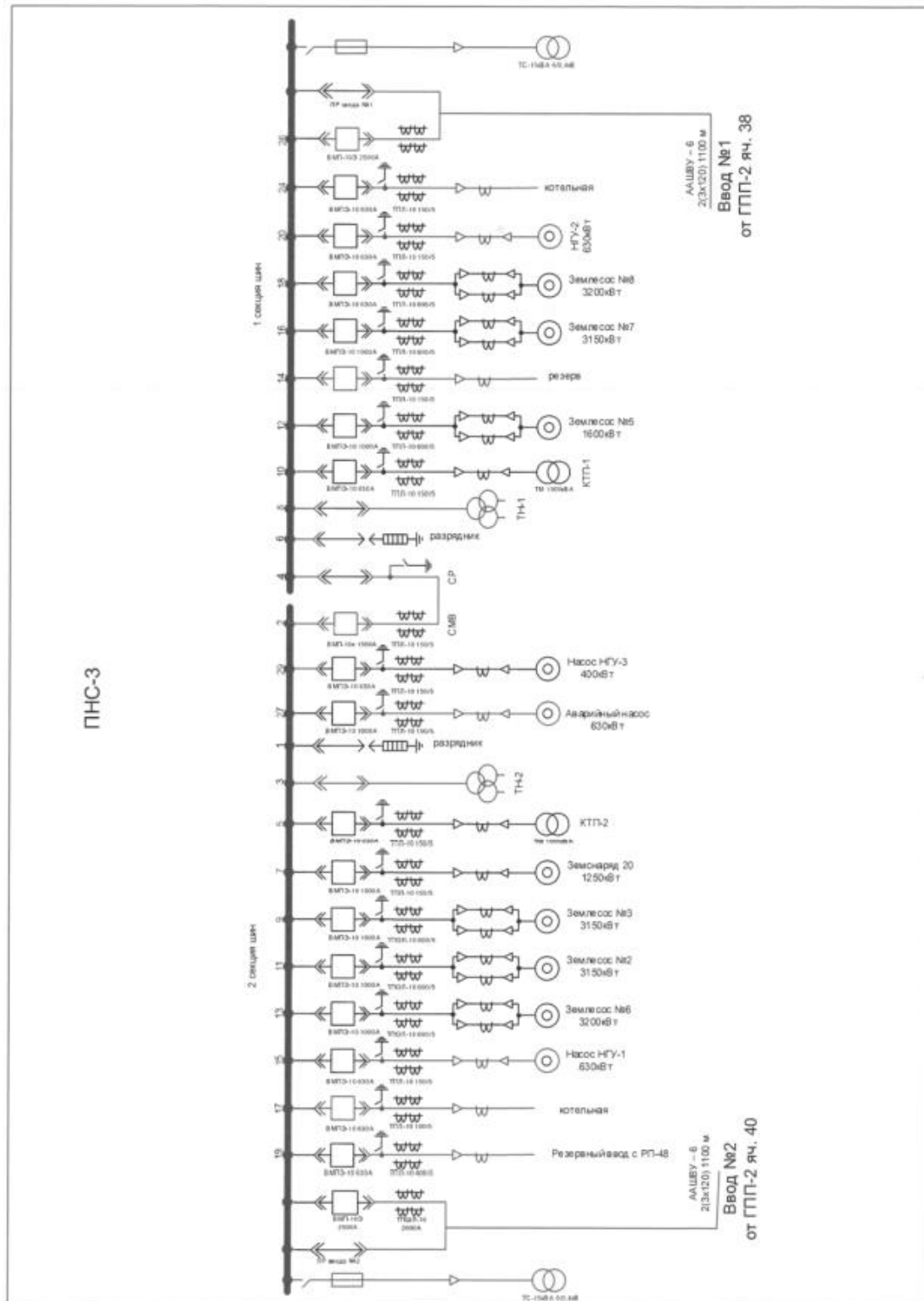
Іншою, найбільш складною проблемою є проблема стабілізації напруги і частоти автономно працюючого АГ, такого, що має «м'яку» зовнішню характеристику. При використанні АГ у складі автономної ВЕУ ця проблема ускладнюється ще і нестабільністю частоти обертання ротора. При проектуванні АГ для ВЕУ оптимізаційні розрахунки ведуть по максимуму ККД в широкому діапазоні зміни частоти обертання і навантаження, а також по мінімуму витрат з урахуванням усієї схеми управління і регулювання.

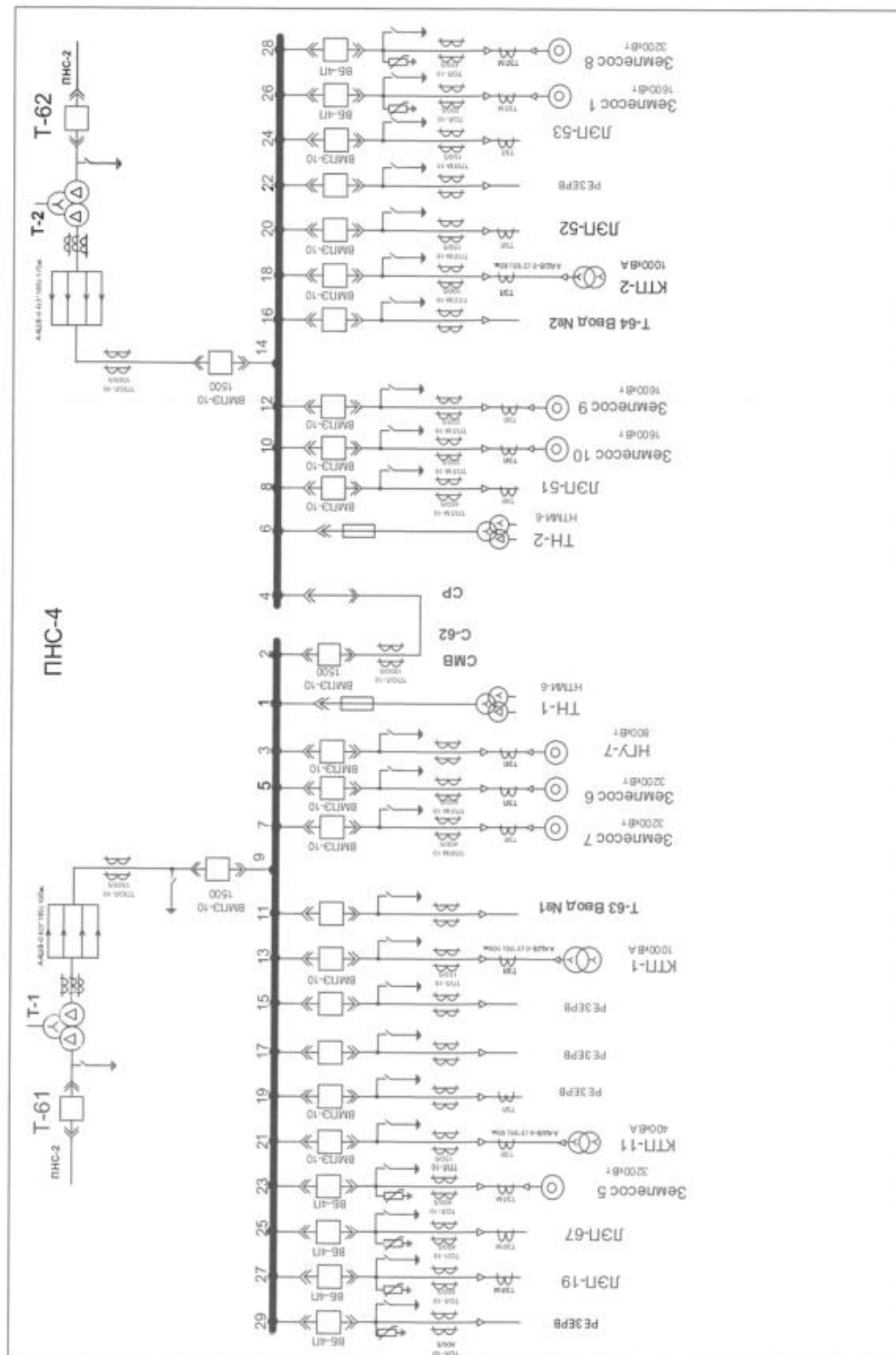
Конструкція генераторів повинна враховувати кліматичні умови роботи ВЕУ, постійно діючі механічні зусилля на елементи конструкції і особливо – потужні електродинамічні і термічні дії при перехідних процесах, які виникають при пусках, перервах живлення, коротких замиканнях, а також при значних поривах вітру.

ДОДАТОК В
СХЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ШЛАМОВОГО ГОСПОДАРСТВА









ДОДАТОК Г
ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ
СТАНЦІЇ В УМОВАХ ВІДВАЛІВ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ
КОМБІНАТІВ

Параметри ВЕУ для більшої наглядності ефективності пропонуємих в роботі рішень виберемо на конкретному прикладі ПАТ «Полтавський ГЗК» (м. Горішні Плавні).

Розрахуємо потужність повітряного потоку на відвалах Полтавського ГЗК за формулою:

$$P_n = 0,5 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot F \quad (\text{Г.1})$$

де ρ – густина повітря; v – середньорічна швидкість вітру; F – площа.

Беручи до рахунку те, що середня швидкість вітру за рік по метеостанції в м. Горішні Плавні складає 4,1 м/с то можна вирахувати середню швидкість за рік на відвалах ПАТ «Полтавський ГЗК». Висота східного відвалу має висоту 130 м, а західного 152 м, з урахуванням висоти мачти 75 м отримаємо:

$$V_{cx} = 4,1 \cdot (178 / 10)^{0,2} = 7,29 \text{ м/с}$$

$$V_{zx} = 4,1 \cdot (200 / 10)^{0,2} = 7,46 \text{ м/с}$$

Враховуючи те, що площа східного і західного відвалів 5200 м² та 7166 м² то потужність повітряного потоку на відвалах становитиме:

$$P_{n.cx} = 0,5 \cdot 1,226 \cdot 7,29^3 \cdot 5200 = 1234941550 \text{ Вт} = 1,23 \text{ ГВт}$$

$$P_{n.zx} = 0,5 \cdot 1,226 \cdot 7,46^3 \cdot 7166 = 1823701522 \text{ Вт} = 1,82 \text{ ГВт}$$

Враховуючи те, що робоча площа відвалу буде $S_{роб} = \frac{3}{4} \cdot S = 5,374 \text{ тис. м}^2$, а з технічних міркувань так як відвал робочий, то ВЕС зможуть зайняти не більше половини цієї площі:

$$S_{роб.ВЕС} = \frac{1}{2} \cdot 5,374 = 2,687 \text{ тис. м}^2$$

Знаючи площу, яка може бути використана для ВЕС можемо розрахувати кількість установок, які можна розмістити. Знаючи, що в регіоні, де знаходиться метеостанція переважний напрям вітру, тому доцільно розміщати ВЕУ рядами перпендикулярними переважному напрямку вітру:

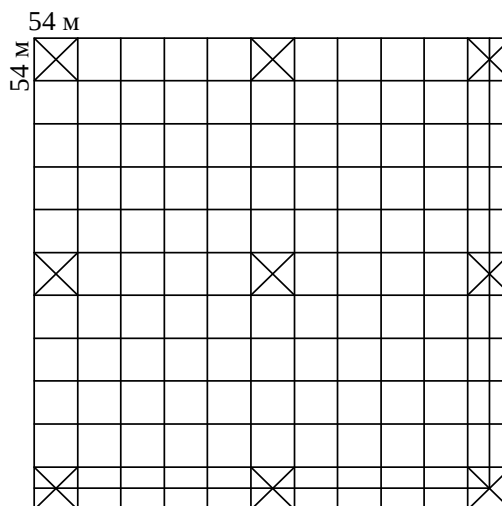


Рисунок Г.1 – Розрахункова схема розташування ВЕУ

Знаючи, що діаметр ротора вітротурбіни складає 54 м, а відстань між сусідніми ВЕУ повинна становити не менше $4D$, то можемо розрахувати площу для 4 ВЕУ:

$$S_{4BEU} = 54 \cdot 54 \cdot 100 = 291600 \text{ м}^2$$

Звідки площа для однієї ВЕУ буде:

$$S_{1BEU} = \frac{291600}{4} = 72900 \text{ м}^2$$

Знаючи загальну робочу площу відвалу та площу, яка необхідна для роботи однієї ВЕУ, розрахуємо скільки ВЕУ можна встановити на заданій площі:

$$n_{BEU} = \frac{S_{роб.ВЕС}}{S_{1BEU}} \quad (Г.2)$$

$$n_{BEU} = \frac{2687250}{72900} = 37 \text{ шт.}$$

З техніко-економічних міркувань та для мінімізації втрат енергії підключення ВЕС планується до ГПП, яке знаходиться найближче до місця розташування ВЕС. В нашому випадку це ГПП 4/1.

Так як планується підключення до силового трансформатора, тому для вибору потужності ВЕС необхідно враховувати коефіцієнти завантаження

трансформаторів. Далі в таблиці представленні покази роботи трансформаторів.

Таблиця Г.1 – Покази роботи трансформаторів ГПП 4/1 ПАТ «Полтавський ГЗК»

Трансф.	U _{ном} , кВ	S _{ном} , МВА	P _{рік} , МВт·р	Q _{рік} , МВАр·р	S _{рік} , МВА·	K _з
ГПП 4/1 6	6	16	18361	377	18365	0,131
ГПП 4/1 6	6	16	12578	6622	14215	0,101
ГПП 4/1 10	10	16	6744	16000	17363	0,124
ГПП 4/1 10	10	16	5800	1360	5957	0,043

Як бачимо з таблиці, коефіцієнти завантаження трансформаторів на ГПП 4/1 дуже малі, що зумовлено специфікою роботи підприємства. Тому для того, щоб знати на скільки ми можемо розвантажити трансформатори необхідно розрахувати втрати до та після підключення ВЕС.

Використовуючи рівняння втрат активної і реактивної енергії в трансформаторі знайдемо його повні втрати за рік з коефіцієнтом завантаження $K_z=0,131$:

$$\Delta P_T = \Delta P_{xx} \cdot T_z + \Delta P_{kz} \cdot k_z^2 \cdot \tau \quad (\text{Г.3})$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{xx} \cdot T_z + \Delta Q_{kz} \cdot k_z^2 \cdot \tau \quad (\text{Г.4})$$

$$\Delta S_T = \sqrt{\Delta P_T^2 + \Delta Q_T^2} \quad (\text{Г.5})$$

де T_z – число годин роботи трансформатора за рік з коефіцієнтом завантаження $K_z=0,131$, $T_z = 5000 \text{ год}$; τ – час максимальних втрат: умовне число годин, на протязі яких максимальний струм протікаючий безперервно, створює втрати енергії, які дорівнюють дійсним втратам енергії за рік, $\tau = 3000 \text{ год}$.

Далі в таблиці представлені технічні параметри трансформатора ТДН 16000/110.

Таблиця Г.2 – Технічні параметри трансформатора ТДН 16000/110

S_H , кВА	U_{BH} , кВ	U_{HH} , кВ	ΔP_{XX} , кВт	ΔP_{K3} , кВт	I_{XX} , %	U_{K3} , %
16000	115	6,6	18	85	0,7	10,5

Розраховуємо втрати реактивної потужності на холостому ході:

$$\Delta Q_{XX} = S_H \cdot \frac{I_{XX}}{100} \quad (4.6)$$

$$\Delta Q_{XX} = 16000 \cdot \frac{0,7}{100} = 112$$

$$\Delta Q_{K3} = S_H \cdot \frac{U_{K3}}{100} \quad (4.7)$$

$$\Delta Q_{K3} = 16000 \cdot \frac{10,5}{100} = 1680$$

$$\Delta P_T = 18 \cdot 5000 + 85 \cdot 0,131^2 \cdot 3000 = 95 \text{ МВт} \cdot \text{год}$$

$$\Delta Q_T = 112 \cdot 5000 + 1680 \cdot 0,131^2 \cdot 3000 = 647 \text{ МВАр} \cdot \text{год}$$

$$\Delta S_T = \sqrt{95^2 + 647^2} = 654 \text{ МВА}.$$

Що у відсотковому співвідношенні складе $\Delta S_T = \frac{654}{18365} \cdot 100 = 3,6\%$.

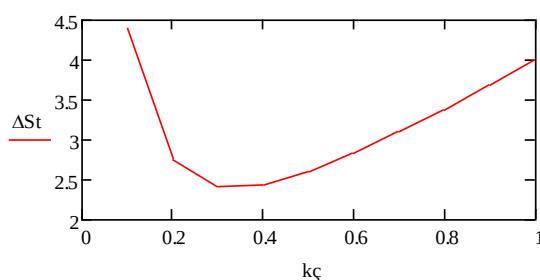


Рисунок Г.2 – Залежність втрат потужності від коефіцієнта завантаження трансформатора ТДН 16000/110

Так, як потужність трансформатора з коефіцієнтом завантаження 0,131 складає близько 2 МВт·год, а трансформатори встановлювалися на

ДОДАТОК Д 1
ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ УМОВ ГІРНИЧО-
ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ КОМБІНАТІВ

Згідно методології, викладеної в попередніх розділах даного дослідження та для подальшого його продовження, для досягнення мети з конкретного рішення дослідимо поведінку ВЕС з 8 вітрогенераторами загальною встановленою потужністю 2 МВт (табл. 3.3).

Таблиця Д1.1 – Технічні параметри досліджуваного вітрогенератора

Номінальна потужність, кВт:	250
Діаметр ротора, м:	54
Омахувана площа, м ² :	2291
Кількість лопатей:	3
Початкова швидкість вітру, м/с:	2,5
Номінальна швидкість вітру, м/с:	9
Масимальна швидкість вітру, м/с:	25
Максимальна висота башти, м:	75

Далі на рис. Д1.1 представлено графік виробітку електричної потужності вітроенергетичною установкою в залежності від швидкості вітру.

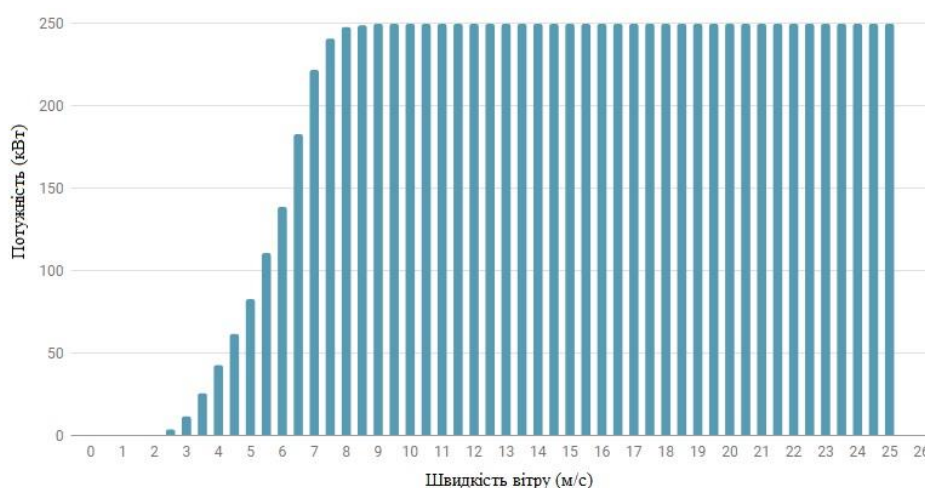


Рисунок Д1.1 – Графік виробітку потужності вітроенергетичною установкою

Враховуючи, що встановлена потужність ВЕС складає 2 МВт, але беручи до уваги непостійність генерації та втрати в лінії та трансформаторі, обираємо трансформатор ТМ 1600/6/0,4.

Далі в таблиці представлені технічні параметри трансформатора ТМ 1600/6/0,4.

Таблиця Д1.2 – Технічні параметри трансформатора ТДН 1600/6/0,4

S_n , кВА	$U_{вн}$, кВ	$U_{нн}$, кВ	ΔP_{xx} , кВт	$\Delta P_{кз}$, кВт	I_{xx} , %	$U_{кз}$, %
1600	6	0,4	2,05	16	1,3	5,5

Блоки датчиків будуть знаходитись в машинному залі вітроенергетичної установки, вхідні сигнали від датчиків та управляючі на виконавчі механізми можуть подаватися безпосередньо в диспетчерський пункт. Однак якщо присутня значна територіальна протяжність, то це означає наявність довгих кабельних ліній від кожного пристрою. Таке рішення з техніко-економічних міркувань може виявитися не раціональним з двох причин:

- висока вартість кабельної продукції;
- зростання рівня електромагнітних перешкод з ростом довжини ліній.

Більш раціональним в такій ситуації є використання станцій розподіленої периферії, розташованих в безпосередній близькості до датчиків і виконавчих механізмів. Такі станції містять необхідні модулі вводу і виводу, а також інтерфейсні модулі для підключення до ПЛК через цифрову польову шину (наприклад, з використанням протоколу Profibus DP, або Modbus RTU). Цифрова передача всіх сигналів здійснюється по одному кабелю з високим рівнем перешкодозахищеності. До польової шини можуть безпосередньо підключатися також так звані інтелектуальні датчики і виконавчі пристрої (мають в своєму складі контролери та інші блоки, що забезпечують перетворення сигналу в цифрову форму і реалізують обмін даними через польову шину).

Польова шина Profibus DP (Process field bus Distributed Periphery) дозволяє з'єднати до 125 пристроїв, до 32 на сегмент (ПЛК, станцій розподіленої периферії, інтелектуальних датчиків і виконавчих пристроїв). Станція розподіленої периферії складається з трьох основних компонентів:

- базової панелі (Baseplate), на яку в спеціальні слоти встановлюють модулі вводу/виводу і інтерфейсні модулі, або спеціальної профільної шини, на яку кріпляться модулі;
- модулів вводу/виводу (I / O Modules);
- інтерфейсних модулів (Interface modules), що забезпечують обмін даними з ПЛК через цифрову польову шину.

Кількість слотів під установку модулів може бути різним (найчастіше від 2 до 16). Крайній лівий слот зазвичай використовується для установки інтерфейсного модуля. Блок живлення може бути встановлений на базовій панелі або може бути використаний окремий (зовнішній) блок. У середині базової панелі проходять дві шини: одна служить для подачі живлення на встановлені модулі; інша – для інформаційного обміну між модулями.

Так як ВЕУ створює значні перешкоди, то передавати радіо сигнал від датчиків, які будуть знаходитись в машинному залі не доцільно. Тому прийнято рішення під'єднати всі датчики до пристрою дистанційної передачі сигналу, який буде розміщений в мачті вітроустановки.

В якості станції розподіленої периферії використовувалася SIMATIC ET 200 Pro.

ET 200 Pro призначена для побудови систем розподіленого вводу-виводу на основі PROFINET IO і PROFIBUS DP, має ступінь захисту IP65/IP66/IP67 і може монтуватися на кероване обладнання без використання шаф управління. У складі станції допускається використовувати електронні модулі введення і виведення дискретних і аналогових сигналів, силові модулі, модулі систем ідентифікації MOBY, а також PROFIsafe модулі систем автоматики безпеки і протиаварійного захисту. Станція має високу стійкість до механічних впливів

і здатна зберігати працездатність при вібраційних навантаженнях з прискоренням до 5g, а також ударних навантаженнях з прискоренням до 25g.

Для вибору високовольтних вимикачів необхідно розрахувати номінальний струм, для ланцюга трансформатор ВЕС-трансформатор:

$$I_n = \frac{S_n}{U_n} \quad (\text{Д1.1})$$

де S_n – номінальна потужність генератора; U_n – номінальна напруга.

$$I_n = \frac{2000}{6} = 333 \text{ А}$$

Вибираємо вимикачі ВРС-6-31,5/630 У2.

Таблиця Д1.3 – Технічні параметри вимикачів ВРС-6-31,5/630 У2.

Номінальна напруга, кВ:	6
Номінальний струм, А:	630
Номінальний струм відключення, кА:	31,5
Струм термічної стійкості, кА:	31,5
Повний час відключення, мс:	70
Власний час включення, мс	120
Власний час відключення, мс:	35-55

Для ланцюга генератор-трансформатор ВЕС:

$$I_n = \frac{250}{0,4} = 625 \text{ А}$$

Вибираємо вимикачі ВВА-0,4-20/1000УЗ.

Таблиця Д1.4 – Технічні параметри вимикачів ВВА-0,4-20/1000УЗ.

Номінальна напруга, кВ:	0,4
Номінальний струм, А:	1000
Номінальний струм відключення, кА:	20
Власний час включення, мс:	60
Власний час відключення, мс:	40

Для ланцюга трансформатор ВЕС-трансформатор обираємо запобіжники ПК(т) 012-6-40-6 УЗ. Для ланцюга генератор ВЕС-трансформатор ПК(т) 012-0,4-100-6 УЗ.

Для вибору кабелів необхідно розрахувати переріз. Струм в нормальному режимі у ланцюзі генератор трансформатор ВЕС, $U_{ном}=380В$:

$$I_{ном} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \cos \varphi} \quad (Д1.2)$$

$$I_{ном} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,9} = 400 А$$

Вибір перерізу проводимо за економічною густиною струму

$$S = \frac{I_{ном}}{J_{ек}}. \quad (Д1.3)$$

Для вибору $J_{ек}$ знайдемо час використання максимальної потужності T_{max} . Для кабелів з алюмінієвими жилами при $T_{max} = 5000 год$, $J_{ек} = 1,7 А / мм^2$ тоді:

$$S = \frac{400}{1,7} = 235 мм^2$$

Вибираємо трьохжильний кабель перерізом $285 мм^2$ (АСБ 3×95-0,38).

Струм в нормальному режимі у ланцюзі трансформатор ВЕС-трансформатор, $U_{ном}=6 кВ$:

$$I_{ном} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,9} = 214 А$$

$$S = \frac{214}{1,7} = 125,8 мм^2$$

Вибираємо трьохжильний кабель перерізом $210 мм^2$ (ААШВ 3×70-6).

ДОДАТОК Д 2
РОЗРАХУНОК ВИТРАТ НА РОЗРОБКУ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ВІД
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТАНЦІЇ

Існують два основних методи розрахунку вартості обсягів капіталовкладень в розробку технологічного рішення:

- Кошторисний метод;
- Метод коефіцієнтів.

Традиційним методом, який широко застосовують у поточному плануванні, є кошторисний. У спеціальних таблицях плану складаються кошториси витрат відповідно до їх статей за групами, видами і т. д. Витрати розраховуються на основі технологічних карт або планових нормативів за елементами витрат на одиницю продукції. Головним недоліком цього методу є велика трудомісткість планових розрахунків.

Метод кошторисного розрахунку передбачає складання кошторисної документації на будівництво об'єкта нерухомості з зазначенням переліку будівельно – монтажних робіт і витрат за кожним видом робіт на заробітну плату, матеріали, електроенергію, інструменти, спеціальне оснащення і т.д., які повинні бути приведені до базисного рівня цін з наступною індексацією в рівень цін на дату оцінки. Це найбільш трудомісткий метод, але він може бути значно полегшений, якщо є первісна кошторисна документація на будівництво оцінюваного об'єкта або повного аналога.

Основною формою планування витрат підприємств є складання кошторисів. Кошторис охоплює всі витрати на виробництво продукції (надання послуг) за плановий період незалежно від ступеня її готовності. Кошториси виконують такі важливі функції: організуюча, контролююча і стимулююча.

Організуюча функція кошторису полягає в тому, що, маючи встановлену планову величину витрат, працівник, відповідальний за їх рівень, намагається дотримуватись чинного регламенту і норм використання ресурсів. Кошториси дають змогу контролювати роботу працівників, відповідальних за рівень витрат. Це здійснюється порівнянням фактичних витрат з плановими, передбаченими в кошторисах. Відхилення аналізуються, що є основою для

реалізації стимулюючої функції щодо працівників, які впливають на величину витрат і відповідають за неї. Стимулювання здійснюється через відповідальність за необґрунтовані витрати і заохочення в їх зниженні.

Для визначення розрахункової та базисної кошторисної вартості (розрахункової та базисної вартості) будівництва проєктованих підприємств, будівель, споруд або їх черг складається кошторисна документація.

Локальні кошториси, локальні ресурсні кошториси є первинними кошторисними документами і складаються на окремі види робіт та витрат по будівлях та спорудах або по загально-майданчикових роботах на основі обсягів, що визначилися при розробленні робочої документації (робочих креслень).

Локальні кошторисні розрахунки складаються також на окремі види робіт та витрат по будівлях та спорудах або по загально-майданчикових роботах замість локальних кошторисів у тих випадках, коли обсяги робіт і розміри витрат остаточно не визначилися та підлягають уточненню.

Об'єктні кошториси, об'єктні ресурсні кошториси об'єднують у своєму складі на об'єкт у цілому дані відповідно з локальних кошторисів, локальних ресурсних кошторисів.

Об'єктні кошторисні розрахунки об'єднують у своєму складі на об'єкт у цілому дані з локальних кошторисних розрахунків і локальних кошторисів та підлягають уточненню.

Кошторисні розрахунки на окремі види витрат складаються в тих випадках, коли необхідно визначити, як правило, у цілому по будові розмір (ліміт) коштів, необхідних для відшкодування тих витрат, що не враховані кошторисними нормативами.

Використовуючи кошторисний метод далі буде представлено розрахунок обладнання вітроенергетичної станції.

Таблиця Д2.1 – Витрати на основні матеріали

№ п.п.	Найменування	Тип	Витрати	Одиниці виміру	Ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
1	Вітрогенератор	EWT Directwind 250/54	8	шт.	5000000	40000000
2	Трансформатор	ТМ 1600/6/0,4	1	шт.	350000	350000
3	ЕОМ		1	шт.	30000	30000
4	Вакуумний вимикач	ВРС-6-31,5/630 У2	1	шт.	150000	150000
5	Вакуумний вимикач	ВВА-0,4- 20/1000У3	8	шт.	100000	800000
6	Запобіжники	ПК(Т) 012-0,4- 40-6 У3	8	шт.	80000	640000
7	Запобіжники	ПК(Т) 012-6-40- 6 У3	1	шт.	100000	100000
8	Комутатор	PoE NETGEAR GSM7228PS- 100EUS	1	шт.	71000	71000
9	Кабель силовий	АСБ 3х95-0,38	3000	м.	138,8	416400
10	Кабель силовий	ААШВ 3х70-6	1700	м.	382	649400
11	Кабель інформаційний	КИС-РПнг(А)- FRHF 2х2х0,97	1500	м.	60	90000
12	Кабель інформаційний	КИС-РПнг(А)- FRHF 1х2х0,50	1300	м.	15	19500
13	Станція розподіленої периферії	ЕТ 200PRO	1	шт.	40500	40500
Разом						44436800

Розраховуємо витрати на транспортування, які становлять близько 5% від початкових капіталовкладень:

$$K_T = K_n \cdot 0,05 \quad (\text{Д2.1})$$

$$K_T = 44436800 \cdot 0,05 = 2221840 \text{ грн.}$$

Розраховуємо витрати на монтаж електрообладнання, які становлять 18% від початкових капіталовкладень:

$$K_M = K_n \cdot 0,18 \quad (\text{Д2.2})$$

$$K_M = 44436800 \cdot 0,18 = 7998624 \text{ грн.}$$

Тоді загальна вартість ВЕС становитиме:

$$K_3 = K_n + K_M + K_T \quad (\text{Д2.3})$$

$$K_3 = 44436800 + 7998624 + 2221840 = 54657264 \text{ грн.}$$

ДОДАТОК Д 3
РОЗРАХУНОК ВИТРАТ НА ЕКСПЛУАТАЦІЮ
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТАНЦІЇ

Експлуатаційні затрати враховують амортизаційні відрахування, витрати на ремонт та технічне обслуговування, а також вартість річних втрат електроенергії (ЕЕ) в трансформаторах, яка має важливе значення під час оцінювання варіантів, оскільки величина витрат на оплату втрат ЕЕ представляється похідним (непрямим) показником технічної сторони варіантів, які порівнюються. Таким чином, експлуатаційні витрати визначаються за формулою:

$$EZ = A_o + P_{mo} + \Pi_p, \quad (\text{ДЗ.1})$$

де A_o – амортизаційні відрахування, грн.

$$A_o = K_e \cdot \frac{a}{100}, \quad (\text{ДЗ.2})$$

де a – річна норма амортизаційних відрахувань, ($a=3,5\%$); P_{mo} – витрати на ремонт та технічне обслуговування, грн; K_e – капіталовкладення.

$$A_o = 350000 \cdot \frac{3,5}{100} = 12250 \text{ грн}$$

$$P_{mo} = K_e \cdot \frac{Z}{100}, \quad (\text{ДЗ.3})$$

де Z – річна норма відрахувань на ремонт та обслуговування, ($2,9\%$); Π_p – інші витрати (1% від капіталовкладень), грн.

$$P_{mo} = 350000 \cdot \frac{2,9}{100} = 10150 \text{ грн}$$

$$\Pi_p = 350000 \cdot \frac{1}{100} = 3500 \text{ грн}$$

$$EZ = 12250 + 10150 + 3500 = 25900 \text{ грн}$$

Річні втрати ЕЕ в трансформаторах визначаються з рівнянь:

$$\Delta P_T = \Delta P_{xx} \cdot T_z + \Delta P_{кз} \cdot k_3^2 \cdot \tau, \quad (\text{ДЗ.4})$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{xx} \cdot T_z + \Delta Q_{кз} \cdot k_3^2 \cdot \tau, \quad (\text{ДЗ.5})$$

$$\Delta S_T = \sqrt{\Delta P_T^2 + \Delta Q_T^2}, \quad (\text{Д3.6})$$

де ΔP_{xx} – втрати потужності при роботі трансформатора на холостому ході;
 T_2 – число годин роботи трансформатора за рік з коефіцієнтом завантаження
 $K_3=0,72$, $T_2 = 7008$ год; ΔP_{k3} – втрати потужності короткого замикання; k_3 –
 коефіцієнт завантаження трансформатора; τ – час максимальних втрат: умовне
 число годин, на протязі яких максимальний струм протікаючий безперервно,
 створює втрати енергії, які дорівнюють дійсним втратам енергії за рік,
 $\tau = 3000$ год; ΔQ_{xx} – втрати реактивної потужності холостого ходу; ΔQ_{k3} –
 втрати реактивної потужності короткого замикання.

Розраховуємо втрати реактивної потужності на холостому ході:

$$\Delta Q_{xx} = S_n \cdot \frac{I_{xx}}{100} \quad (\text{Д3.7})$$

$$\Delta Q_{xx} = 1600 \cdot \frac{1,3}{100} = 20,8 \text{ кВАр}$$

$$\Delta Q_{k3} = S_n \cdot \frac{U_{k3}}{100} \quad (\text{Д3.8})$$

$$\Delta Q_{k3} = 1600 \cdot \frac{5,5}{100} = 104 \text{ кВАр}$$

$$\Delta P_T = 2,05 \cdot 7008 + 18 \cdot 0,72^2 \cdot 3000 = 44,4 \text{ МВт} \cdot \text{рік}$$

$$\Delta Q_T = 16 \cdot 7008 + 104 \cdot 0,72^2 \cdot 3000 = 307,5 \text{ МВАр} \cdot \text{рік}$$

$$\Delta S_T = \sqrt{44,4^2 + 307,5^2} = 310,7 \text{ МВА} \cdot \text{рік}$$

ДОДАТОК Д 4
РОЗРАХУНОК ОБСЯГІВ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Розрахувати потужність, яку виробляє одна вітроустановка, можна за формулою:

$$N_{вк} = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3 \cdot \xi}{2}, \quad (Д4.1)$$

де ρ – густина повітря; S – площа, описана лопатями вітроколеса; ξ – коефіцієнт використання вітру; v – середньоперіодна швидкість вітру.

Описана площа лопатями вітроколеса:

$$S = \pi \cdot R^2 = 3,14 \cdot 27^2 = 2289 \text{ м}^2$$

$$N_{вк} = \frac{1,226 \cdot 2289 \cdot 7,46^3 \cdot 0,4}{2} \approx 233 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

З урахуванням того, що ККД обраного генератора становить 0,92, то потужність вироблена при швидкості повітряного потоку 7,46 м/с становитиме:

$$N_{1вг} = N_{вк} \cdot \eta_{г} \quad (Д4.2)$$

де $N_{вк}$ – потужність вітрового колеса, кВт; $\eta_{г}$ – ККД генератора.

$$N_{1вг} = 233 \cdot 0,92 = 214 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Розрахуємо кількість згенерованої електроенергії за рік 8 установками:

$$N_{вес} = 8 \cdot N_{вк} \cdot T_p \quad (Д4.3)$$

де $T_{роб}$ – кількість годин роботи ВЕС за рік.

Кількість годин роботи вітроустановки за рік з коефіцієнтом попиту $K_n=0,8$:

$$T_{роб} = 8760 \cdot K_n = 8760 \cdot 0,8 = 7008 \text{ год}.$$

$$N_{вес} = 8 \cdot 214 \cdot 7008 = 11997696 \text{ кВт} = 11,99 \text{ ГВт} \cdot \text{рік}$$

Врахочуючи, що втрати на передачу електричної енергії до точки підключення складуть близько 12%, а витрати на освітлення та на живлення власних потреб близько 3%, отримаємо:

$$N_{вес} = 11997696 \cdot 0,85 = 10198041 \text{ кВт} \cdot \text{рік} = 10,198 \text{ ГВт} \cdot \text{рік}$$

Враховуючи втрати в трансформаторі отримаємо:

$$N_{\text{вс}} = 10198041 - 310700 = 9,887 \text{ ГВт} \cdot \text{рік}$$

ДОДАТОК Е
РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТАНЦІЇ

Економічний ефект від впровадження науково-дослідницької роботи (НДР) розраховується за типовими методиками розрахунку ефекту від впровадження нововведень. Вирізняють три види економічного ефекту: попередній, очікуваний та фактичний.

Попередній економічний ефект встановлюють при обґрунтуванні теми наукового дослідження та включення її до плану робіт. Розраховують його за орієнтовними, укрупненими показниками з урахуванням обсягу впровадження результатів досліджень.

Очікуваний економічний ефект розраховують у процесі виконання НДР. Його умовно відносять (прогнозують) до визначеного періоду (року) впровадження НДР у виробництво. Очікуваний ефект розраховують не тільки на один рік, але і на більш тривалі періоди (інтегральний результат). Орієнтовно такий період становить до 10 років від початку впровадження для нових матеріалів та до 5 років для конструкцій, приладів, технологічних процесів. Очікуваний економічний ефект розраховують організації, які виконують наукові розробки.

Фактичний економічний ефект визначається після впровадження наукових розробок у виробництво, але не раніше ніж через 1 рік. Розрахунок його виконують за фактичними витратами на наукові дослідження та впровадження з урахуванням конкретних вартісних показників даної галузі (підприємства), де були впроваджені наукові розробки. Фактичний економічний ефект розраховують підприємства, на яких здійснюється впровадження результатів НДР.

Фактичний економічний ефект є найбільш достовірним критерієм економічної ефективності виконання НДР.

Визначити, чи доцільно використовувати даний вітроенергетичний комплекс, чи виправдає він витрачені на нього кошти та час, чи дозволить отримувати певний прибуток, а головне – скільки часу на це чекати, можна за допомогою нескладної методики.

Основним показником економічної доцільності використання вітроенергетичної станції є річний економічний ефект. Річний економічний ефект – величина, яка включає в себе прибуток, отриманий від використання даного комплексу, за винятком витрат на капітальний ремонт та річну амортизацію.

Річний економічний ефект визначається за формулою:

$$E = \Pi_p - (E_a + E_p) \cdot K_z, \text{ грн.}, \quad (\text{E.1})$$

де Π_p – річний прибуток від використання вітроенергетичного комплексу, грн.; E_a – річні амортизаційні витрати, %; E_p – річні витрати на ремонт, %; K_z – початкові капіталовкладення, грн.

Для вибраної вітроенергетичної станції приймаємо значення: $E_a = 10\%$ від початкових капіталовкладень; $E_p = 15\%$.

Кількість коштів, які підприємство буде економити за рахунок використання вітрової установки, яка генеруватиме електричну енергію за рік:

$$Q_p = (N_{вес} \cdot C_{ee}) - EZ, \text{ грн.}, \quad (\text{E.2})$$

де $N_{вес}$ – потужність, яку виробляє за рік дана ВЕС, кВт; C_{ee} – тариф на 1 кВт потужності, що для підприємств становить 2,34 грн/кВт · год.

$$Q_p = (9887341 \cdot 2,34) - 22500 = 23136377 \text{ грн.}$$

Отже, річний економічний ефект становитиме:

$$E = 23136377 - (0,1 + 0,15) \cdot 54657264 = 9472061 \text{ грн.}$$

Не менш важливим є термін окупності вітроенергетичної станції:

$$T_{ок} = \frac{K_z}{E}, \text{ років}, \quad (\text{E.3})$$

$$T_{ок} = \frac{54657264}{9472061} = 5,77 \text{ роки}$$

Дана вітроенергетична станція окупиться за 6 років. Для електроенергетики ефективними є ті пристрої та прилади, термін окупності яких становить не більше 5-6 років.

Розрахунок дисконтованого терміну окупності впровадження вітроенергетичної станції.

Розрахунок ставки дисконтування на основі методу модифікованої моделі оцінки капіталовкладень CAPM.

Модель оцінки капітальних активів – CAPM відображає майбутню прибутковість, прибутковість по безризиковому активу та премією за ризик. В результаті, якщо очікувана дохідність акції буде нижче, ніж необхідна прибутковість інвестори відмовляться від капіталовкладення в даний актив.

Переваги та недоліки моделі оцінки капітальних активів CAPM:

- модель заснована на фундаментальному принципі зв'язку прибутковості акції ринкового ризику, що є її перевагою;
- модель включає в себе тільки один фактор (ринковий ризик) для оцінки майбутньої прибутковості акції. Такі дослідники, як Ю. Фама, К. Френч та ін. ввели додаткові параметри в модель CAPM для збільшення точності прогнозування;
- модель не враховує податки, трансакційні витрати, непрозорість фондового ринку і т. д.

Головний недолік моделі CAPM – це однофакторність. Тому в модифікованій моделі оцінки капітальних активів включені також поправки на несистематичний ризик. Несистематичний ризик ще називається специфічним ризиком, який проявляється тільки при певних умовах. Формула розрахунку модифікований моделі CAPM наступна:

$$r_i = r_f + \beta \cdot (r_m - r_f) + r_u, \quad (\text{E.4})$$

де r_i – очікувана дохідність акції (ставка дисконтування); r_f – дохідність по безризиковому активу (державні облігації); r_m – ринкова дохідність; β – коефіцієнт бета; r_u – ризикована премія, яка включає несистематичний ризик компанії.

В табл. Е.1 показані різні поправки на ризик.

Таблиця Е.1 – Поправки на специфічні ризики

Специфічні ризики	Поправка на ризик, %
Вплив держави на тарифи	0,4
Зміна цін на сировину, енергію, комплектуючі, аренду	0,2
Управлінський ризик акціонерів	0,2
Вплив ключових поставщиків	0,3
Вплив сезонності попиту на продукцію	0,4
Умови залучення капіталу	0,3
Загалом, поправка на специфічний ризик:	1,8

Використання модифікованої моделі дозволяє більш точно визначити майбутню норму прибутку.

Метод розрахунку ставки дисконтування на основі моделі Гордона.

Це метод розрахунку ставки дисконтування, що полягає у використанні моделі Гордона (модель постійного зростання дивідендів). Даний метод має певні обмеження на використання, адже для того щоб оцінити ставку дисконту необхідно, щоб компанія випускала звичайні акції з дивідендними виплатами. Нижче наводиться формула розрахунку вартості власного капіталу підприємства (ставки дисконтування):

$$r = \frac{DIV}{P \cdot (1 - fc)} + g, \quad (E.5)$$

де DIV – розмір очікуваних дивідендних виплат на одну акцію за рік; P – ціна розміщення акції; fc – витрати на емісію акцій; g – темп приросту дивідендів.

Найбільш відомим і найчастіше застосовуваним у практиці прийняття інвестиційних рішень є показник чистої теперішньої вартості (NPV), що також відомий як «чиста приведена цінність», «чиста дисконтована вартість» або «дисконтовані вигоди». Цей показник відображає приріст цінності фірми в результаті реалізації проекту, оскільки він являє собою різницю між сумою грошових надходжень (грошових потоків – припливів), які виникають при

реалізації проекту і приводяться (дисконтуються) до їх теперішньої вартості, та сумою дисконтованих вартостей усіх витрат (грошових потоків – відтоків), необхідних для здійснення цього проекту. Багато аналітиків вважають чисту теперішню вартість найкращим критерієм для більшості проектів.

Метод підбору ставки дисконту:

$$IRR = r_1 + (r_2 - r_1) \cdot \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2}, \quad (E.6)$$

де r_1, r_2 – ставки дисконту; NPV_1, NPV_2 – показник чистої теперішньої вартості.

Метод чистого дисконтованого доходу дозволяє провести оцінку майбутніх наявних грошових потоків:

$$ЧДД = \frac{ГП}{(1 + \tau)^t}, \quad (E.7)$$

де $ГП$ – грошовий потік; τ – ставка дисконту, яка залежить від багатьох факторів, у тому числі від інфляції; t – кількість років реалізації проекту.

Якщо чистий дисконтований дохід більше 0, то проект вважається вигідним, якщо менше, то проект недоцільний.

Переваги методу:

1. Він дає оцінку приросту вартості.
2. Проект має властивість адекватності, тобто чистий дисконтований дохід у всіх проектів дорівнює чистому дисконтованому доходу усіх активів, що входять до нього.
3. Легка модифікованість, у випадку коли ставка дисконту приймається різною за роками.
4. Дозволяє зробити правильний вибір при наявності проектів з нерівномірними грошовими потоками.
5. Дозволяє зробити правильний вибір при оцінці не тільки одного проекту, але й проаналізувати та порівняти взаємовиключаючі об'єкти.

Недоліки методу:

1. Даний показник не дає оцінки економічної ефективності проекту.
2. Величина чистого дисконтованого доходу не завжди відповідає більш ефективному варіанту інвестування.
3. Показник не враховує інформацію про можливі помилки в проекті.

Срок дії проекту становить $t=10$ років, капітальні витрати складають $KB=54657264$ грн, приймаємо ставку дисконту 20%, щорічна економія (грошовий потік) $E=9472061$ грн. При розрахунках враховував, що середньорічна зміна тарифу на електроенергію складає 10%.

Таблиця Е.2 – Метод чистого дисконтованого доходу

Рік	0 рік	1 рік	2 рік	3 рік	4 рік	5 рік	6 рік	7 рік
Показник								
ГП, млн. грн.	-54,68	9,472	11,785	14,316	17,085	20,15	23,51	27,17
ДГП, млн. грн.	-54,68	7,89	8,18	8,28	8,24	8,09	7,87	7,58
НЧДП, млн. грн.	-54,68	-46,79	-38,61	-30,33	-22,09	-14	-6,13	1,45

$$ДГП = \frac{ГП}{(1 + \tau)^t} \quad (E.8)$$

$$ДГП_1 = \frac{9,472}{(1 + 0,2)^1} = 7,89 \text{ млн. грн.}$$

$$ДГП_2 = \frac{11,785}{(1 + 0,2)^2} = 8,18 \text{ млн. грн.}$$

$$ДГП_3 = \frac{14,316}{(1 + 0,2)^3} = 8,28 \text{ млн. грн.}$$

$$ДГП_4 = \frac{17,085}{(1 + 0,2)^4} = 8,24 \text{ млн. грн.}$$

$$ДГП_5 = \frac{20,15}{(1 + 0,2)^5} = 8,09 \text{ млн. грн.}$$

$$ДГП_6 = \frac{23,51}{(1+0,2)^6} = 7,87 \text{ млн. грн.}$$

$$ДГП_7 = \frac{27,17}{(1+0,2)^7} = 7,58 \text{ млн. грн.}$$

$$T_{ок}^{диск} = 6 + \frac{|-6,13|}{7,58} = 6,9 \text{ років}$$

ДОДАТОК Є
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

I. Статті

1. С. М. Бойко, І. О. Сінчук, А. П. Сінолиций, Є. О. Несмашний, О. В. Дозоренко. Особливості прогнозування рівнів енергоспоживання в умовах розподільчих електричних мереж залізрудних підприємств / Гірничий вісник: науково-технічний збірник. – Кривий Ріг, 2019. – Вип. 105. – С. 24–29. <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2019-1-105-24-29>.

2. Сінчук О. М., Сінчук І. О., Дозоренко О. В. Діагностика та прогнозування рівнів електроспоживання залізрудних копалень. Мікросистеми, електроніка та акустика. Національний технічний університет України «КПІ». 2019. Том. 24, №2(109). С. 25–32. <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2019.24.2.169731>.

3. І. О. Сінчук, С. М. Бойко, І. В. Касаткіна, О. В. Дозоренко. Аспекти розвитку вітроенергетики в умовах залізрудних підприємств // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2021. – Вип. 52. – С. 70–76. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-52-70-77>.

4. Sinchuk, O., Sinchuk, I., Beridze, T., Filipp, Y., Budnikov, K., Dozorenko, O., & Strzelecki, R. (2021). Assessment of the factors influencing on the formation of energy-oriented modes of electric power consumption by water-drainage installations of the mines. Mining of Mineral Deposits, 15(4), 25-33. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.025>.

5. Сьомочкин А. Б. До форматизації варіантів керування вітроелектричною установкою / А. Б. Сьомочкин, О. В. Дозоренко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи : щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук : КрНУ, 2022. – Вип. 1/2022 (57). – С. 46-54. <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.1.57.46-54>.

II. Тези

1. Дозоренко О. В., Краснопольський Р. І. Штрихи до проблеми використання повітряних потоків підземних виробок залізрудних шахт для мікроелектростанцій // Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-

економічні наслідки діяльності підприємств ГМК : збірник наукових праць VI Міжнародної науково-технічної конференції. – Кривий Ріг : Р. А. Козлов, 2019. – С. 100.

2. Сінчук І. О., Дозоренко О. В. Аналіз вітрового потенціалу підприємств гірничодобувної галузі криворізького залізрудного басейну. Збірник праць всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Новітні технології у науковій діяльності та навчальному процесі. НУ «Чернігівська політехніка», 2021.

3. Сінчук О. М., Бойко С. М., Федотов В. О., Дозоренко О. В. До питання формування енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації електричної енергії гірничорудних підприємств. Розвиток промисловості та суспільства, КНУ, 2021.

4. Дозоренко О. В., Сьомочкин А. Б. Особливості роботи вітроенергетичної установки з асинхронним генератором з ємнісним збудженням. Всеукраїнська науково-практична конференція «актуальні питання гірничо-металургійного виробництва»: збірник тез доповідей. / Кривий Ріг: КНУ, 2021.

III. Патенти

1. О. Сінчук, С. Бойко, О. Дозоренко, та В. Демків. Пристрій для електротехнічного комплексу електропостачання підприємства з вітроенергетичними установками: пат. 121291 Україна : H02J 3/38 (2006.01), H02J 9/04 (2006.01). № u 2017 06756 ; заявл. 29.06.2017 ; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22. 4 с.

ДОДАТОК Ж
АПРОБАЦІЯ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких науково-технічних конференціях та семінарах:

- на VI Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності підприємств ГМК», (м. Кривий Ріг, 2019);

- на Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. «Новітні технології у науковій діяльності та навчальному процесі» (НУ «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, 2021).

- на Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (КНУ, м. Кривий Ріг, 2021).

- на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні питання гірничо-металургійного виробництва» (КНУ, м. Кривий Ріг, 2021).

ДОДАТОК 3
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор

ТОВ «НВК Криворіжелектромонтаж»

Кулемін В. В.

м. Кривий Ріг

« 28 листопада » 2022 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Дозоренка Олега Вікторовича «Енергоефективна система електропостачання територіально віддалених споживачів електричної енергії гірничо-збагачувальних комбінатів»

ТОВ «НВК Криворіжелектромонтаж» – провідне спеціалізоване підприємство криворізького регіону по проектуванню, монтажу та налагодженню систем електропостачання (СЕП) гірничорудних підприємств з втіленням в їх структури комплексів обліку (в тому числі погодинних) рівнів споживання електричної енергії.

У зв'язку з такою спрямованістю підприємство постійно веде пошук нових сучасних і перспективних розробок для втілення їх в практику розробки СЕП з комплексами контролю та керування рівнями споживання електричної енергії для умов гірничорудних підприємств.

У такому варіанті діяльності підприємства цікавими виглядають результати досліджень Дозоренка О. В., які викладені в дисертаційній роботі «Енергоефективна система електропостачання територіально віддалених споживачів електричної енергії гірничо-збагачувальних комбінатів». Конкретно проектувальники та розробники СЕП підприємства «Криворіжелектромонтаж», згідно пропозицій Дозоренка О. В., використовують наступні доробки його дисертаційної роботи:

– концепцію застосування вітроенергетичних установок в складі автономних енергетичних комплексів для живлення віддалених споживачів, які базуються на відвалах пустих порід та шламосховищах гірничозбагачувальних комбінатів;

– метод синтезу електромеханічних систем вітроенергетичних установок в напрямку досягнення бажаного рівня енергоефективності та залежність енергетичних параметрів функціонування електромеханічних систем вітроенергетичних установок від впливу і взаємовпливу на них індивідуальних показників складових автономного генеруючого комплексу.

Розрахунки очікуваного економічного ефекту від впровадження таких систем в середньому складають близько 10 млн. грн. в рік (в цінах 2022 р.) від одної вітроенергетичної станції.

Начальник виробничого
відділу



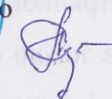
Северенчук П. П.

Начальник фінансового
відділу



Ніконенко І. А.

Начальник проектно-конструкторського
відділу



Літвяк В. Г.



КОМПАНІЯ З ВИРОБНИЦТВА
ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ
ТОВ "РУДОМАЙН"

50000, Україна, Кривий Ріг
пр. Поштовий, 1, каб 430
тел: +38 (056) 462 62 22
тел/факс: +38(056) 404 12 80
email: sales@rudomain.com.ua
secretar@rudomain.com.ua
<http://www.rudomain.com.ua>

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Дозоренка Олега Вікторовича «Енергоефективна система
електропостачання територіально віддалених споживачів електричної енергії
гірничо-збагачувальних комбінатів» в практику роботи ТОВ «РУДОМАЙН»

Ознайомившись з представленими матеріалами дисертаційної роботи
Дозоренка Олега Вікторовича «Енергоефективна система електропостачання
територіально віддалених споживачів електричної енергії гірничо-
збагачувальних комбінатів» ТОВ «РУДОМАЙН» висловлює підтримку
проведенню таких наукових досліджень.

ТОВ «РУДОМАЙН» – підприємство з видобутку залізорудної сировини
відкритим способом. Родовище багатих залізних руд – кар'єр «Південний»
знаходиться в південній частині Саксаганського району м. Кривий Ріг.
Підприємство постійно розвивається, щороку збільшуються потужності
виробництва, закуповується і модернізується обладнання.

У зв'язку з такою спрямованістю ТОВ «РУДОМАЙН» веде активний
пошук способів зменшення собівартості видобутку залізної руди взагалі та
зниження енергоємності цього процесу зокрема. В тому числі шляхом
втілення в практику своєї роботи нових сучасних і перспективних розробок
нових структур систем електропостачання з сегментами контролю та
керування рівнями споживання електричної енергії.

У такому варіанті діяльності підприємства цікавими виглядають
результати досліджень Дозоренка О. В., які викладені в дисертаційній роботі
«Енергоефективна система електропостачання територіально віддалених
споживачів електричної енергії гірничо-збагачувальних комбінатів». ТОВ
«РУДОМАЙН» з цікавістю досліджує для умов свого підприємства наступні
доброби проведених досліджень а саме:

- концепцію застосування вітроенергетичних установок в складі
автономних енергетичних комплексів для живлення віддалених
споживачів, які базуються на відвалах пустих порід та
шламосховищах гірничозбагачувальних комбінатів.



50000, Україна, Кривий Ріг

пр. Поштовий, 1, каб 430
тел: +38 (056) 462 62 22
тел/факс: +38(056) 404 12 80
email: sales@rudomain.com.ua
secretar@rudomain.com.ua
<http://www.rudomain.com.ua>

Були отримані позитивні результати наведеної доробки та очікуваний економічний ефект від впровадження таких систем, в середньому, може скласти близько 3 млн. грн. в рік (в цінах 2022 р.) для умов гірничих підприємств ТОВ «РУДОМАЙН».

ТОВ «РУДОМАЙН» підтримує дисертаційні дослідження та розглядає подальшу перспективу впровадження результатів дисертаційної роботи Олега Дозоренка в перспективу роботи підприємства.

Директор
ТОВ «РУДОМАЙН»

10 травня 2022 рік.



Колос В.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. проректора з
наукової роботи
проф., докт. техн. наук
Бровко Д.В.

«5» травня 2022 р.

АКТ

впровадження в учбовий процес результатів дисертаційного дослідження
Дозоренка Олега Вікторовича «Енергоефективна система електропостачання
територіально віддалених споживачів електричної енергії гірничо-
збагачувальних комбінатів»

Комісія у складі декана електротехнічного факультету, к.т.н., доцента Федотова В.О., в.о. начальника учбового відділу університету Івашури С. Л., заступника завідувача кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті, к.т.н., Пересунько І.І., вченого секретаря кафедри, к.т.н., доцента Касаткіної І. В. склали цей акт про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційного дослідження Дозоренка Олега Вікторовича «Енергоефективна система електропостачання територіально віддалених споживачів електричної енергії гірничо-збагачувальних комбінатів» при читанні учбових дисциплін, починаючи з 2020 року по даний час:

Для спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка за третім (освітньо-науковим) рівнем вищої освіти на здобуття ступеня доктора філософії:

1. Електропостачання та електробезпека електрообладнання потужних технологічних і технічних комплексів. Проблеми, перспективи. Розділи:

1.1 Поточний стан та перспективи розвитку електроенергетики України;

1.2 Інтеграція об'єднаної електроенергетичної системи України до загальноєвропейської енергосистеми;

1.3 Електричні навантаження міст та промислових підприємств;

1.4 Основні фізичні величини, що характеризують графіки навантаження;

1.5 Електропостачання від альтернативних джерел електроенергії;

1.6 Якість електроенергії в електричних мережах і способи її забезпечення;

2. Автономні системи електроживлення стаціонарних та рухомих об'єктів.

3. Електромеханічні системи з відновлювальними джерелами енергії.

Для спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка за першим (освітньо-науковим) рівнем вищої освіти бакалавр:

1. Способи покращення якості електроенергії в мережах живлення
2. Електропостачання промислових підприємств
3. Енергоефективні системи та комплекси

у вигляді:

– методів моделювання складних електротехнічних систем з джерелами розосередженої генерації; елементів теорії ймовірності та математичної статистики; методів оптимізації складних технічних об'єктів, у тому числі при синтезі електроенергоефективних систем електропостачання з використанням відновлювальних джерел електроенергії; оцінки ефективності заходів по підвищенню електроенергоефективності систем електропостачання-електроспоживання гірничо-збагачувальних комбінатів для складання відповідних програм;

– оцінки та методу використання потенціалу підвищення ефективності використання електроенергії на залізрудних підприємствах України; методологічних аспектів підходу до аналізу процесу електроенергопостачання гірничо-збагачувальних комбінатів від електротехнічного комплексу вітроенергетичної станції;

– методики визначення енергетичних характеристик вітроенергетичних установок в залежності від локації вітроенергетичних установок в структурі систем електропостачання гірничо-збагачувальних комбінатів та конфігурації розташування на мапі гірничих виробок;

– залежності енергетичних параметрів функціонування електромеханічних систем вітроенергетичних установок від індивідуальних конструктивних показників складових автономного генеруючого комплексу, що дає можливість змінювати режими роботи вищезазначених комплексів в залежності від необхідного рівня енергоспоживання та вітрової ситуації в місці їх дислокації;

– програмного забезпечення в яке входять математичні моделі та методи керування режимами електропостачання-електроспоживання виробничих систем при впровадженні в їх структури відновлювальних джерел електроенергії на базі вітроенергетичних установок; методики побудови оптимального графіка електричного вантаження як виробничої, так і електричної системи гірничорудного комплексу з урахуванням прогновної потужності генерації електроенергії вітроенергетичною станцією.

Комісія встановила відповідність впровадження результатів вимогам проведення учбових занять при підготовці студентів за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Голова комісії
Члени комісії



Федотов В. О.
Івашура С. Л.
Пересунько І.І.
Касаткіна І. В.