

Міністерство освіти і науки України  
Криворізький національний університет  
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи бакалавра  
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ  
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ  
МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Виконав: здобувач вищої освіти групи ЕЕМ-21-2

Данило РАДЕЙКО

Керівник випускної роботи \_\_\_\_\_ д-р ф-ії, ст. викладач Олег ДОЗОРЕНКО

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ д-р ф-ії, ст. викладач Олег ДОЗОРЕНКО

Декан ЕТФ \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2025 р.

## **ЗАЯВА**

### **щодо самостійності виконання кваліфікаційної роботи**

Я, Радейко Данило Ігорович, здобувач вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка заявляю, що моя кваліфікаційна робота, яка подана до екзаменаційної комісії для публічного захисту, виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату. Всі запозичення з друкованих та електронних джерел, а також із захищених раніше кваліфікаційних робіт, кандидатських і докторських дисертацій мають відповідні посилання.

Я ознайомлений з діючим Положенням про запобігання і виявлення академічного плагіату. Згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску письмової роботи до захисту та застосування дисциплінарних заходів.

10 червня 2025 р.

---

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Радейка Данила Ігоровича  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз та оптимізація режимів функціонування вітроенергетичних установок в електроенергетичних мережах промислових підприємств

2. Строк подання студентом роботи 15 червня 2025 р.

3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи

Мета роботи – дослідження та оптимізація режимів роботи вітроенергетичних установок в електроенергетичній мережі гірничорудного підприємства.

Завдання кваліфікаційної роботи: розглянути стан вітроенергетики України та актуальність її впровадження в практику роботи гірничорудних підприємств; з'ясувати можливі режими роботи вітроенергетичних установок; проаналізувати особливості підключення вітроенергетичних установок до електричних мереж гірничорудних підприємств; на основі моделі одиначної вітроенергетичної установки провести модельні дослідження режимів її роботи; розробити концептуальні рішення щодо оптимізації режимів роботи вітроенергетичних установок у складі електроенергетичних мереж гірничорудних підприємств.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)

1. Актуальний стан вітроенергетики в Україні. 2. Аналіз режимів роботи вітроенергетичних установок. 3. Аналіз систем електропостачання гірничозбагачувальних комбінатів 4. Особливості підключення вітроенергетичних станцій до електричних мереж гірничорудних підприємств. 5. Алгоритм

функціонування електротехнічного комплексу вітроенергетичної станції. 6. Модельні дослідження режимів роботи вітроенергетичних установок.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Порівняльна характеристика режимів роботи вітроенергетичних установок. 2. Способи підключення вітроенергетичних станцій до електричних мереж гірничорудних підприємств. 3. Алгоритм функціонування електротехнічного комплексу вітроенергетичної станції. 4. Результати моделювання роботи системи.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали консультанта | Дата, підпис   |                  |
|--------|---------------------------------|----------------|------------------|
|        |                                 | Завдання видав | Завдання прийняв |
| I      | Дозоренко О.В.                  |                |                  |
| II     | Дозоренко О.В.                  |                |                  |

7. Календарний план

| № | Етапи роботи                                                                                                        | Термін виконання  |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 1 | Розглянути стан вітроенергетики України та актуальність її впровадження в практику роботи гірничорудних підприємств | 15 травня 2025 р. |
| 2 | З'ясувати можливі режими роботи вітроенергетичних установок                                                         | 20 травня 2025 р. |
| 3 | Виконати аналіз систем електропостачання гірничо-збагачувальних комбінатів                                          | 24 травня 2025 р. |
| 4 | Проаналізувати особливості підключення вітроенергетичних установок до електричних мереж гірничорудних підприємств   | 28 травня 2025 р. |
| 5 | Обґрунтування вибору генератора для вітроенергетичної установки                                                     | 30 травня 2025 р. |
| 6 | Проведення модельних досліджень режимів роботи вітроенергетичних установок                                          | 6 червня 2025 р.  |
| 7 | Аналіз результатів та оптимізація режимів роботи                                                                    | 10 червня 2025 р. |

Дата видачі завдання 12.05.2025 р.

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
(підпис) (ПІБ)

Данило РАДЕЙКО

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис) (ПІБ)

Олег ДОЗОРЕНКО  
(ПІБ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Аналіз та оптимізація режимів функціонування вітроенергетичних установок в електроенергетичних мережах промислових підприємств»: 52 с., 28 рис., 5 табл., 33 літературних джерела.

Об'єкт дослідження – вітроенергетичні установки та режими її роботи у складі електроенергетичних мереж промислових підприємств.

У першому розділі виконано аналіз актуального стану вітроенергетики України. Розглянуто особливості застосування автономних джерел генерації електроенергії в системах електропостачання промислових підприємств. Проведено аналіз режимів роботи вітроенергетичних установок. Описано особливості підключення вітроенергетичних станцій до електричних мереж гірничорудних підприємств.

У другому розділі розглянуто особливості вибору типу генератора для електротехнічного комплексу вітроенергетичної установки. Представлено модель вітроенергетичної установки з асинхронним генератором з ємнісним збудженням, на основі якої проведено наступні дослідження: динаміки одиночної вітроенергетичної установки в автономному режимі; дослідження динаміки одиночної вітроенергетичної установки разом з енергосистемою; дослідження режимів одиночної вітроенергетичної установки в різних режимах із включенням у їх структуру конденсаторних батарей. Показано результати моделювання режимів роботи системи.

ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА, ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНА  
МЕРЕЖА, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ПРОМИСЛОВІ ПІДПРИЄМСТВА

|           |      |                |        |      |                         |                     |      |         |
|-----------|------|----------------|--------|------|-------------------------|---------------------|------|---------|
|           |      |                |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.Р |                     |      |         |
| Змн.      | Арк. | № докум.       | Підпис | Дата | Реферат                 | Літ.                | Арк. | Акрушів |
| Розробив  |      | Радейко Д.І.   |        |      |                         |                     | 5    | 1       |
| Перевірів |      | Дозоренко О.В. |        |      |                         |                     |      |         |
| Н. Контр. |      | Дозоренко      |        |      |                         | КНУ<br>гр. ЕЕМ-21-2 |      |         |
| Затвердж. |      | Федотов В.О.   |        |      |                         |                     |      |         |

## ЗМІСТ

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                                                                                  | 7  |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ ТА СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ .....                        | 8  |
| 1.1 Актуальний стан вітроенергетики в Україні.....                                                                           | 8  |
| 1.2 Розосереджена генерація електричної енергії .....                                                                        | 11 |
| 1.3 Застосування автономних джерел генерації електричної енергії в системах електропостачання гірничорудних підприємств..... | 16 |
| 1.4 Аналіз режимів роботи вітроенергетичних установок .....                                                                  | 18 |
| 1.5 Аналіз систем електропостачання гірничо-збагачувальних комбінатів.....                                                   | 24 |
| 1.6 Особливості підключення вітроенергетичних станцій до електричних мереж гірничорудних підприємств .....                   | 27 |
| 1.7 Розробка алгоритму функціонування електротехнічного комплексу вітроенергетичної станції.....                             | 31 |
| РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК.....                                               | 34 |
| 2.1 Загальні питання вибору генератора для вітроенергетичної установки.....                                                  | 34 |
| 2.2 Модель вітроенергетичної установки з асинхронним генератором з ємнісним збудженням .....                                 | 36 |
| 2.2.1 Дослідження динаміки вітроенергетичної установки в автономному режимі.....                                             | 37 |
| 2.2.2 Дослідження динаміки вітроенергетичної установки разом з енергосистемою.....                                           | 44 |
| 2.2.3 Функціонування вітроенергетичних установок із включенням у їх структуру конденсаторних батарей .....                   | 47 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                                                | 49 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                                              | 50 |

|           |      |              |        |      |                         |  |  |                     |      |         |   |  |
|-----------|------|--------------|--------|------|-------------------------|--|--|---------------------|------|---------|---|--|
|           |      |              |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.3 |  |  |                     |      |         |   |  |
|           |      |              |        |      |                         |  |  |                     |      |         |   |  |
| Змн.      | Арк. | № докум.     | Підпис | Дата | Зміст                   |  |  | Літ.                | Арк. | Акрушів |   |  |
| Розробив  |      | Радейко Д.І. |        |      |                         |  |  |                     |      | 6       | 1 |  |
| Перевірів |      | Дозоренко    |        |      |                         |  |  | КНУ<br>гр. ЕЕМ-21-2 |      |         |   |  |
|           |      |              |        |      |                         |  |  |                     |      |         |   |  |
| Н. Контр. |      | Дозоренко    |        |      |                         |  |  |                     |      |         |   |  |
| Затвердж. |      | Федотов В.О. |        |      |                         |  |  |                     |      |         |   |  |

## ВСТУП

Більше 30 % загальнопромислового обсягу споживання електричної енергії (ЕЕ) в Україні припадає на підприємства гірничо-металургійної галузі [1–3]. Саме ці підприємства є енергоємними [4], і, як наслідок такої ситуації є факт збільшення електроенергетичного сегменту в комплексі собівартості видобутку залізорудної сировини.

Більше 80% від усього обсягу ЕЕ цих підприємств споживають приймачі напругою живлення 6-10 кВ. В той же час функціонує значна кількість споживачів із рівнем напруги 0,4-0,22 кВ. Більшість з них функціонують на відвалах (складах) пустих порід і знаходиться в радіусі близько 20-25 км від найближчих до них головних понижуючих підстанцій підприємств. Загальна упосереднена протяжність таких ліній електропередач (ЛЕП) складає близько 100-150 км [5]. Тому, в такому варіанті електропостачання існують значні втрати ЕЕ та часті виходи з ладу локальних мереж.

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

Реальною є можливість використання енергії потоків вітру, що існують на відвалах кар'єрів підприємств гірничо-видобувного комплексу [6], тобто впровадження вітроенергетичних установок (ВЕУ).

Але для забезпечення ефективної роботи ВЕУ, у складі електроенергетичних мереж даних промислових підприємств, треба дослідити режими роботи цих джерел розосередженої генерації для їх подальшої оптимізації в залежності від специфіки, умов та режимів роботи конкретного підприємства.

|           |      |              |        |      |                          |                     |         |
|-----------|------|--------------|--------|------|--------------------------|---------------------|---------|
|           |      |              |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.ВС |                     |         |
| Змн.      | Арк. | № докум.     | Підпис | Дата |                          |                     |         |
| Розробив  |      | Радейко Д.І. |        |      | Вступ                    | Літ.                | Арк.    |
| Перевірів |      | Дозоренко    |        |      |                          |                     | Акрушів |
|           |      |              |        |      |                          | 7                   | 1       |
| Н. Контр. |      | Дозоренко    |        |      |                          | КНУ<br>гр. ЕЕМ-21-2 |         |
| Затвердж. |      | Федотов В.О. |        |      |                          |                     |         |

# РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ ТА СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

## 1.1 Актуальний стан вітроенергетики в Україні

В сьогоднішній час досить гостро постають питання забезпечення енергетичної безпеки, надійності та безперебійності електропостачання. Відповідно до [1] загалом можна виділити наступні основні напрямлення:

1. Розвиток відновлювальної енергетики;
2. Мінімізація втрат ЕЕ в системах електропостачання-електроспоживання;
3. Впровадження інтелектуальних систем електропостачання Smart grid та micro grid систем.

Ця стратегія передбачає розвиток та впровадження відновлювальних джерел енергії (ВДЕ).

Документ передбачає досягнення низки орієнтовних цілей: частка енергії з ВДЕ у валовому кінцевому споживанні має становити 27 % до 2030 року, у загальному первинному енергопостачанні – 70 % до 2050 року, а кінцевою метою є досягнення кліматичної нейтральності до 2060 року.

Зміцнення енергетичної безпеки, підвищення рівня незалежності та рух до вуглецево нейтральної економіки планується забезпечити шляхом інтенсивного розширення потужностей ВДЕ. Згідно з даними Міненерго [1], до 2050 року очікується досягнення наступних орієнтирів: потужність вітрової енергетики – до 140 ГВт, сонячної генерації – до 94 ГВт, систем накопичення ЕЕ – до 38 ГВт, теплової та біоенергетичної – до 18 ГВт, гідроенергетики – до 9 ГВт.

Водночас повномасштабне вторгнення Росії спричинило серйозні виклики для енергетичної системи України, зокрема – для відновлюваної енергетики. На початку 2022 року сумарна встановлена

|                                                                          |      |                |        |      |                          |      |         |
|--------------------------------------------------------------------------|------|----------------|--------|------|--------------------------|------|---------|
| потужність об'єктів ВДЕ, що працювали за «зеленим» тарифом, перевищувала |      |                |        |      | КНУ.РБ.141.25.249С-11.01 |      |         |
| Змн.                                                                     | Арк. | № докум.       | Підпис | Дата | Розділ 1                 |      |         |
| Розробив                                                                 |      | Радейко Д.І.   |        |      |                          |      |         |
| Перевірів                                                                |      | Дозоренко О.В. |        |      |                          |      |         |
| Н. Контр.                                                                |      | Дозоренко      |        |      |                          |      |         |
| Затвердж.                                                                |      | Федотов В.О.   |        |      |                          |      |         |
|                                                                          |      |                |        |      | Літ.                     | Арк. | Акрушів |
|                                                                          |      |                |        |      |                          | 8    | 25      |
|                                                                          |      |                |        |      | КНУ<br>гр. ЕЕМ-21-2      |      |         |

9,5 ГВт. Унаслідок вторгнення було окуповано близько 25 % цих потужностей. Особливо критична ситуація склалася у вітроенергетиці – під окупацією опинилося приблизно 75 % ( $\approx 1,25$  ГВт) вітроенергетичних станцій (ВЕС), а також 14 % ( $>0,6$  ГВт) сонячних електростанцій (СЕС).

Незважаючи на ці втрати, ВДЕ залишаються вагомим джерелом енергії в національному енергетичному балансі. У 2023 році частка ЕЕ, виробленої на ВЕС та СЕС, становила 10 %. З урахуванням виробітку гідроелектростанцій цей показник зріс до 20,3 %, що навіть перевищує довоєнний рівень. У 2022–2023 роках було введено більше 650 МВт потужностей ВДЕ, зокрема з них: 371 МВт – СЕС; 227 МВт – ВЕС.

Але для досягнення цілей Нацплану [1], Україні за 6 років потрібно побудувати втричі більше потужностей, ніж є на сьогоднішній день. І факт в тому, що з точки зору наявності територій для розміщення нових потужностей, це теоретично можливо. Найближчі прогнози щодо введення в експлуатацію ВЕС теж дають надію: вже підготовлено до початку будівництва близько 4 ГВт ВЕС. А згідно Нацплану [1] – потрібно близько 6,1 ГВт вітрової енергії за наступні 6 років.



Рисунок 1.1 – Вітрові станції України станом на кінець 2021 року

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

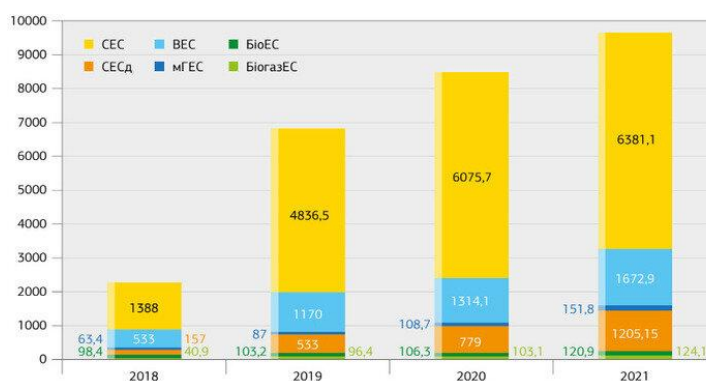


Рисунок 1.2 – Український сектор ВДЕ напередодні війни (динаміка росту встановленої потужності)

Інтеграція ВДЕ в об'єднану енергосистему (ОЕС) супроводжується низкою викликів, зокрема – проблемами зі стабільністю електропостачання. Коливання напруги, характерні для генерації з ВЕС і СЕС, можуть негативно впливати на роботу чутливого обладнання. Наприклад, у Німеччині протягом 3-х років після активного впровадження ВДЕ, кількість технічних відмов зростає більш ніж на 30 %, близько 50 % яких призвели до зупинки виробництва [7].

Міжнародний досвід [7] свідчить, що при збільшенні частки нестабільної генерації з ВЕС і СЕС виникають труднощі з підтриманням енергобалансу – тобто забезпеченням рівноваги між виробництвом і споживанням ЕЕ в режимі реального часу. ОЕС здатна приймати частину енергії з ВДЕ без істотних ускладнень. Однак при перевищенні порогових значень з'являються мережеві та режимні обмеження. У більшості випадків ця критична межа від загального обсягу споживання ЕЕ становить приблизно 10 %. Вищевказана інформація підкреслює необхідність впровадження резервних потужностей для регулювання енергобалансу.

Як зазначено в [1], розвиток відновлюваної енергетики в Україні може відбуватись за декількома сценаріями, кожен з яких вимагатиме тих чи інших заходів для ефективного балансування ОЕС.

Національна енергетична компанія «Укренерго» пропонує збалансовану стратегію розвитку, що включає два основні напрями. Перший полягає у введенні близько 2,5 ГВт швидкоманеврових балансуючих потужностей (газові

пікери), що дозволить зменшити навантаження на ТЕС та уникнути обмеження генерації з ВДЕ. Найбільш ефективним рішенням у цьому напрямі є будівництво компактних газових електростанцій із можливістю виходу на повну потужність протягом 10 хвилин, а також впровадження систем накопичення ЕЕ для оперативного балансування енергоспоживання в межах однієї години.

Другим ключовим елементом стратегії є створення високоточних систем прогнозування обсягів генерації ЕЕ. Похибка прогнозу «на добу наперед» має не перевищувати 10 %, в свою чергу, протягом доби – 5 %. Відсутність таких інструментів зумовлює зростання потреби у маневрових потужностях, які наразі забезпечуються в основному за рахунок вугільної генерації на ТЕС – найдорожчого та екологічно найшкідливого джерела енергії.

Таким чином, для ефективного балансування ОЕС необхідно розробити сучасну високоточну систему прогнозування, насамперед для вітрової енергетики. Згідно з вимогами енергоринку, така система має забезпечувати прогноз на поточну та добу наперед. Наприклад, при врахуванні прогнозу роботи ВЕС на 4 години наперед, потреба в короткострокових резервах зростає до 10 % від їх встановленої потужності.

В управлінні енергетичною сферою замість побудови нових великих об'єктів, має бути концентрація на закупівлі газових пікерів (невеликих високоманеврувальних газових електростанцій), біогазових ТЕС та систем накопичення ЕЕ для станцій ВДЕ.

## ***1.2 Розосереджена генерація електричної енергії***

Відповідно до енергетичної стратегії [1] для забезпечення енергетичної безпеки, надійності та екологічності електропостачання планується перехід від централізованого електропостачання до енергосистеми з розосередженими (децентралізованими) джерелами генерації ЕЕ.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 11   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Розосереджена генерація ЕЕ – це виробництво ЕЕ невеликими генераторами, які розташовані поблизу місць споживання, а не централізовано на великих електростанціях [8].

До основних характеристик розосередженої генерації можна віднести наступні:

- мала або середня потужність: зазвичай від кількох кВт до кількох МВт;
- розташування поруч із споживачем: наприклад, СЕС на даху будинку або вітроенергетична установка (ВЕУ) на промисловому підприємстві;
- використання ВДЕ: сонце, вітер, біомаса, малі ГЕС, геотермальна енергія;
- можливість автономної роботи або паралельно з мережею.

Можна навести наступні приклади:

- сонячні панелі у приватному домогосподарстві;
- біогазові установки на фермі;
- ВЕУ на території промислового підприємства;
- дизельні генератори у лікарнях як резервне джерело живлення.

Переваги:

- зменшення втрат при транспортуванні ЕЕ;
- підвищення надійності енергозабезпечення;
- екологічність – часто використовуються «зелені» джерела;
- можливість участі споживачів у виробництві ЕЕ.

Недоліки:

- потреба у керуванні розподіленою мережею;
- висока початкова вартість обладнання;
- залежність від погодних умов (для ВДЕ).

Розосереджена генерація відіграє ключову роль у трансформації сучасних енергетичних систем. Її значення зростає на тлі переходу до децентралізованих, гнучких, стійких і «зелених» енергомереж, зокрема в рамках розвитку концепції Smart Grid (розумних мереж) [9].

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 12   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Роль розосередженої генерації у сучасних енергетичних мережах:

1. Підвищення енергетичної стійкості.

Розосереджена генерація дозволяє локальним споживачам мати незалежне або резервне джерело ЕЕ, зменшуючи ризики відключень при аваріях у централізованій мережі, що особливо важливо для критичної інфраструктури.

2. Зменшення втрат ЕЕ.

Оскільки ЕЕ виробляється ближче до місця її споживання, зменшуються втрати при її транспортуванні, що підвищує загальну енергоефективність мережі.

3. Інтеграція ВДЕ.

Сонячні панелі, вітрові турбіни, біогазові установки — це типові джерела розосередженої генерації. Вони знижують викиди CO<sub>2</sub> та сприяють декарбонізації енергосистеми.

4. Розвиток активного споживача.

Побутові споживачі й компанії можуть одночасно споживати та генерувати ЕЕ, продаючи її надлишок у мережу, що створює нову економічну модель взаємодії між споживачем і мережею.

5. Формування «розумних» (інтелектуальних) мереж (Smart Grids).

Для ефективної роботи з розосередженими джерелами потрібна автоматизація, цифровізація та гнучке управління енергопотоками. Smart Grids дозволять забезпечувати баланс попиту й пропозиції ЕЕ в режимі реального часу, враховуючи змінну генерацію ЕЕ від ВДЕ.

6. Можливість створення енергетичних мікромереж (microgrids).

Локальні мережі з автономною генерацією, які можуть працювати як у складі загальної енергосистеми, так і окремо. Застосовується у віддалених районах, на військових об'єктах, промислових підприємствах.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 13   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика централізованої та розосередженої генерації ЕЕ

| Критерій                            | Централізована генерація                              | Розосереджена генерація                               |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Масштаб</b>                      | Великі електростанції (сотні/тисячі МВт)              | Малі та середні джерела (кіловати – десятки МВт)      |
| <b>Розташування</b>                 | Далеко від споживача (часто за межами міста)          | Поруч зі споживачем (на об'єкті або поруч)            |
| <b>Типи джерел</b>                  | ТЕС (вугілля, газ, АЕС, великі ГЕС)                   | Сонце, вітер, біомаса, малі ГЕС, когенерація          |
| <b>Втрати при передачі</b>          | Високі (через довгі лінії електропередач)             | Мінімальні (через коротку відстань до споживача)      |
| <b>Інвестиційна модель</b>          | Державні або великі приватні компанії                 | Децентралізовані інвестори: домогосподарства, бізнес  |
| <b>Час та вартість будівництва</b>  | Довготривале будівництво, висока капіталовкладеність  | Швидше будівництво, часто нижча вартість              |
| <b>Гнучкість та масштабованість</b> | Обмежена гнучкість, важко адаптувати                  | Висока гнучкість і можливість масштабування           |
| <b>Стійкість до збоїв</b>           | Вразлива до аварій на лініях або станціях             | Вища надійність при мережевому або локальному резерві |
| <b>Участь споживача</b>             | Пасивна роль (тільки споживання)                      | Активна роль (можливість бути «prosumers»)            |
| <b>Екологічний вплив</b>            | Зазвичай вищий (викиди CO <sub>2</sub> , забруднення) | Часто нижчий (ВДЕ, локальний вплив)                   |
| <b>Залежність від мережі</b>        | Повна залежність від централізованої мережі           | Може працювати автономно або в складі мікромереж      |

Наразі існує сучасний підхід [9–10] – комбінація централізованої та розосередженої генерації в гібридних енергетичних системах, який поєднує масштаб і стабільність традиційної енергетики з гнучкістю та екологічністю новітніх розосереджених рішень.

Гібридна енергосистема – це система, яка поєднує централізовані джерела електроенергії (наприклад, великі ТЕС, АЕС, ГЕС) з розосередженими джерелами (ВДЕ, малі когенераційні установки, побутові СЕС) і здатна управляти ними в єдиному балансі.

Поєднання цих двох систем відбувається наступним чином:

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 14   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

### 1. Інтеграція у спільну мережу.

Обидва типи генерації ЕЕ під'єднані до єдиної розподільчої мережі. Розосереджені джерела або доповнюють централізовану генерацію, або частково її замінюють, особливо в години пік.

### 2. Управління через Smart Grid.

Розумні мережі автоматично керують навантаженням, джерелами генерації, накопичувачами енергії (наприклад – акумуляторними батареями), балансом попиту та пропозиції.

### 3. Використання накопичувачів.

Надлишок енергії з ВДЕ зберігається в акумуляторах або використовується для виробництва водню (Power-to-Gas). Це дає змогу зменшити залежність від централізованих джерел у пікові моменти.

### 4. Резервування і гнучкість.

Централізовані електростанції використовуються як резервні або регулюючі потужності на випадок нестабільності генерації ВДЕ. Це дозволяє уникати перебоїв у електропостачанні.

Таблиця 1.2 – Переваги гібридного підходу

| Перевага                   | Пояснення                                                  |
|----------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Стабільність</b>        | Централізовані джерела забезпечують базове навантаження    |
| <b>Гнучкість</b>           | Розосереджені ВДЕ швидко реагують на зміну попиту або ціни |
| <b>Економія</b>            | Менше втрат у мережі та менші витрати на передавання       |
| <b>Екологічність</b>       | Зменшення викидів завдяки використанню ВДЕ                 |
| <b>Стійкість до аварій</b> | У разі збою одна частина системи може компенсувати іншу    |

Отже, гібридна енергосистема – це компроміс між надійністю централізованої генерації та перевагами розосередженої, який дозволяє будувати ефективну, стійку, адаптивну і чисту енергосистему майбутнього.

### 1.3 Застосування автономних джерел генерації електричної енергії в системах електропостачання гірничорудних підприємств

Розглянемо застосування автономних джерел ЕЕ на прикладі типового вітчизняного гірничо-збагачувального комбінату. Аналіз встановлених потужностей електроприймачів ЕЕ гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) показує, що в середньому вони сягають близько 600 кВА [11–12]. В свою чергу, рівні споживання ЕЕ структурними підрозділами таких підприємств значно різняться (рис. 1.3).

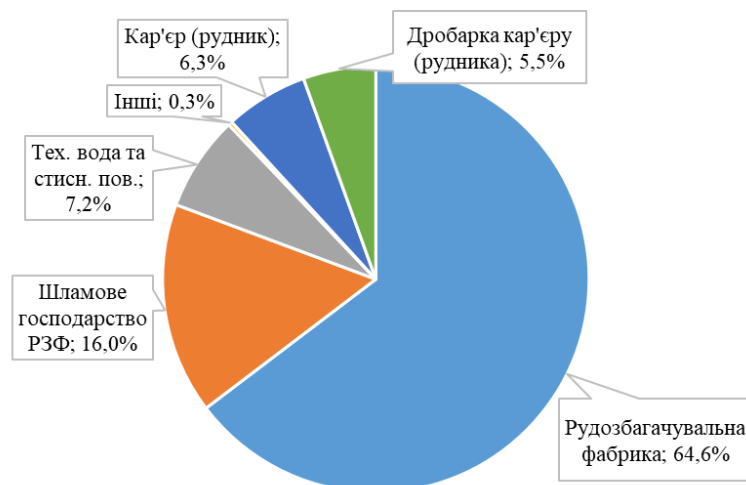


Рисунок 1.3 – Упосереднений за 2016-2021 роки розподіл рівнів споживання ЕЕ між споживачами вітчизняних гірничо-збагачувальних комбінатів

Крім цього, ці підприємства займають великі земельні площі та мають відповідну розгалудженість ЛЕП. При цьому, згідно технології функціонування даних підприємств, більша частина земельних площ – технологічні ділянки виробництва, де роботи проводяться на відкритим способом – кар'єри, відвали пустих порід, шламосховища і т. п. Ці ділянки займають до 75-80 % від всіх промислових у площ.

Логічно вбачається, що в даній ситуації є потенційним задіяння автономних джерел генерації ЕЕ, і, перш за все, для забезпечення власних потреб цих технологічних ланцюгів процесу видобутку та збагачення руди [10, 12].

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 16   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

До числа таких відновлювальних джерел ЕЕ, перш за все, можна віднести вітрову, сонячну та гідроенергетику [13–14]. Разом з тим, використання СЕС в умовах ГЗК є проблематичним у зв'язку зі значним забрудненням повітря образивними металомісткими речовинами, що осідають на всі прилеглі поверхні забруднюючи їх стійким шаром металопилу [6].

Це вагомий аргумент щодо недоцільності застосування СЕС без розробки та використання ефективних антизабруднюючих засобів та заходів.

Важливою та негативною для екології рисою в локації розташування відвалів та території ГЗК є те, що ці техногенні суб'єкти розташовуються у самому місті, тоюто їх дислокація знаходиться безпосередньо серед житлових масивів на відстані близько 500-800 м.

Саме ці суб'єкти можуть і повинні бути використанні для позитиву і одним з таких суттєвих позитивів є можливість розташування на них об'єктів генерації ЕЕ, що функціонують на відновлювальних джерелах ЕЕ.

До переліку таких джерел, із можливістю забезпечення достатнього рівня енергоефективності, відносяться ВЕУ, тому вони і є пріоритетом серед інших видів генерації ЕЕ в аналізованому варіанті.

Основою цього є наступне:

- шламосховища та відвали пустих порід являють собою значні за площею частини земельної території, яка на офіційному рівні виведена зі землекористування;
- висоти таких суб'єктів складають в середньому 50-150 м над землею;
- практично нульовий рівень негативного впливу на екологію;
- ВЕУ достатньо стійкі в функціонуванні в умовах гірничих підприємств.

Тому, створення автономних джерел живлення систем електропостачання ГЗК на базі ВЕУ вбачається ефективним варіантом. Також, важливим моментом є факт екології та можливість варіативності встановлених електричних потужностей ВЕУ в залежності від рівня технологічного попиту і як свідчать дослідження [6, 10, 12] він зростає.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 17   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

До прикладу, відповідно до табл. 1.3 та рис. 1.4, споживання ЕЕ приймачами шламосховищ вітчизняних ГЗК за 2 роки з 2019 р. по 2021 р. збільшився на 25 %. Така тенденція існуватиме і в подальшому [6, 12].

Таблиця 1.3 – Показники рівнів споживання ЕЕ складовими технології роботи ГЗК (НК ГЗК, м. Кривий Ріг)

| Квартал | Дата       | РУ  | ДФ  | РОФ  | ШХ   | ТВ  |
|---------|------------|-----|-----|------|------|-----|
| 1       | 20.02.2019 | 4,1 | 6,1 | 61,8 | 15,5 | 7,7 |
| 2       | 20.05.2019 | 3,5 | 5,7 | 63,2 | 16,9 | 7   |
| 3       | 20.08.2019 | 3,5 | 6   | 65,8 | 14   | 7,9 |
| 4       | 20.11.2019 | 3,3 | 6,1 | 64,5 | 15,6 | 7,6 |
| 5       | 20.02.2020 | 2,5 | 6,2 | 61,7 | 16,4 | 7,3 |
| 6       | 20.05.2020 | 2,5 | 6,2 | 61,7 | 16,4 | 7,3 |
| 7       | 20.08.2020 | 2,9 | 5,6 | 64,4 | 13,8 | 7,8 |
| 8       | 20.11.2020 | 3,1 | 5,7 | 62,4 | 17,5 | 7,5 |
| 9       | 20.02.2021 | 3,2 | 5,1 | 66,9 | 12,9 | 7,5 |
| 10      | 20.05.2021 | 3,4 | 5,9 | 66,4 | 13,1 | 7,4 |
| 11      | 20.08.2021 | 2,9 | 5,1 | 60,2 | 20,3 | 7,2 |
| 12      | 20.11.2021 | 3,5 | 5   | 59,6 | 20,8 | 6,6 |

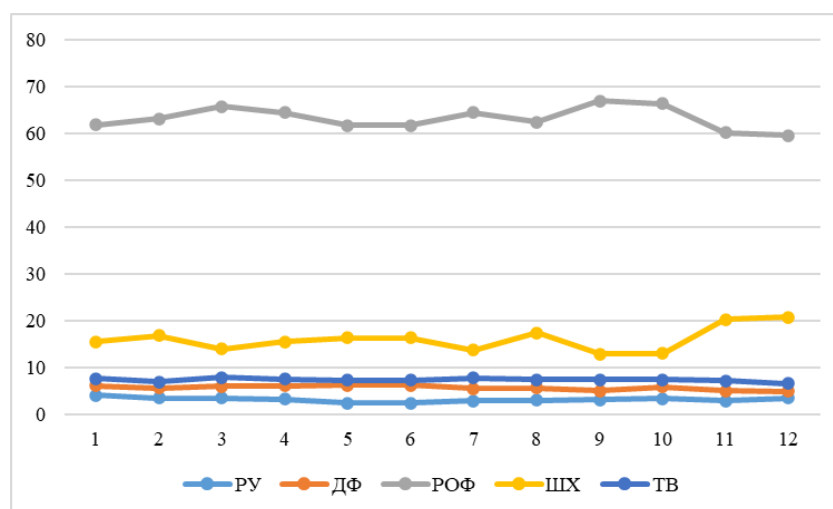


Рисунок 1.4 – Показники рівнів споживання ЕЕ складовими технології роботи ГЗК (м. Кривий Ріг)

#### 1.4 Аналіз режимів роботи вітроенергетичних установок

Існує декілька можливих режимів роботи ВЕУ чи то ВЕС: автономний, локальний та на розподільчу (централізовану) електромережу, наприклад підприємства [15]. Ці режими роботи ВЕС відрізняються за способом взаємодії з енергосистемою та характером споживання ЕЕ. Розглянемо їх більш детально.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 18   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## 1. Автономний режим роботи ВЕС.

Автономний режим (off-grid) передбачає роботу ВЕС незалежно від централізованої електромережі. Вітростанція забезпечує ЕЕ окремий об'єкт (будинок, ферму, віддалену станцію тощо) і не потребує підключення до зовнішньої електромережі. Часто використовується разом з акумуляторами для накопичення енергії або з резервними джерелами (наприклад, дизель-генератором). Підходить для місцевостей, де відсутнє або економічно не вигідне підключення до мережі.

Переваги:

- повна енергетична незалежність;
- ефективне рішення для віддалених чи ізольованих регіонів.

Недоліки:

- висока вартість акумуляторних систем;
- залежність від погодних умов (вітер);
- потреба в системах управління енергією для стабільності живлення.

## 2. Локальний режим роботи ВЕС.

Локальний режим (on-grid або grid-tied) передбачає підключення ВЕС до місцевої централізованої електромережі. ВЕС забезпечує ЕЕ локальних споживачів (підприємства, житлові будинки), а надлишки можуть передаватися до загальної електромережі [16]. Часто застосовується система «зеленого» тарифу або Net Metering (зарахування надлишкової ЕЕ). У разі відсутності вітру споживач отримує енергію з мережі.

Переваги:

- можливість зменшення витрат на ЕЕ;
- надійне джерело енергії – мережа виступає резервом;
- простота у використанні (немає потреби в акумуляторах).

Недоліки:

- залежність від централізованої мережі;
- вимагає дозвільної документації та технічних умов на підключення.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 19   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Таблиця 1.4 – Характеристика автономного та локального режимів

| Параметр                  | Автономний режим              | Локальний режим        |
|---------------------------|-------------------------------|------------------------|
| Підключення до мережі     | Немає                         | Є                      |
| Необхідність акумуляторів | Обов'язкова                   | Необов'язкова          |
| Енергетична незалежність  | Повна                         | Часткова               |
| Надлишкова енергія        | Накопичується або втрачається | Може продаватися       |
| Надійність постачання     | Залежить від вітру і батарей  | Вища за рахунок мережі |

### 3. Робота на централізовану мережу.

Режим роботи ВЕС на централізовану мережу – це один із ключових способів інтеграції вітрової енергії в енергосистему. Такий режим передбачає підключення ВЕС до загальної електромережі (централізованої), з можливістю передачі виробленої ЕЕ споживачам через енергетичну інфраструктуру [17].

Основні етапи та особливості режиму роботи:

#### 1. Генерація ЕЕ.

Вітрогенератори перетворюють кінетичну енергію вітру в механічну, а потім – в електричну за допомогою генераторів. Залежно від швидкості вітру, генерація може бути змінною, тому потрібне регулювання та прогнозування потужності.

#### 2. Стабілізація параметрів ЕЕ.

Вихідна ЕЕ (зазвичай змінного струму, частота і напруга можуть змінюватися) проходить через перетворювальне обладнання (інвертори, перетворювачі), що забезпечує відповідність параметрам централізованої мережі (50 Гц, 230/400 В або 110/220 кВ). Також використовуються системи контролю реактивної потужності, фільтрації гармонік, стабілізації напруги.

#### 3. Підключення до мережі.

ВЕС підключається до енергомережі через трансформаторні підстанції, які підвищують напругу до рівня, потрібного для транспортування енергії.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 20   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Передача здійснюється по лініях електропередач до споживачів або енергетичних хабів.

#### 4. Регулювання та диспетчеризація.

ВЕС працює під контролем диспетчерських центрів, які координують виробництво, згідно з графіками навантаження та балансуванням енергосистеми. Застосовується система SCADA для моніторингу в реальному часі, керування та аналізу ефективності роботи ВЕС.

#### 5. Інтеграція в енергосистему.

ВЕС може виступати як незалежний виробник електроенергії та продавати ЕЕ на ринок (через так звані «зелені» тарифи, аукціони тощо). Часто застосовуються договори купівлі-продажу ЕЕ.

Переваги такого режиму:

- постійне постачання ЕЕ споживачам;
- можливість заробітку за рахунок продажу ЕЕ;

Недоліки:

- залежність від погодних умов (непостійність генерації);
- потреба в додаткових інвестиціях у стабілізацію мережі;
- необхідність балансування з іншими джерелами (ГЕС, ТЕС, накопичувачі енергії).

Обсяг потужності ВЕС, підключених до централізованої мережі, має суттєвий вплив на параметри та стабільність енергосистеми, котрий стає особливо помітним при високому рівні впровадження ВЕС, що наведено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Вплив обсягу встановленої потужності ВЕС на параметри централізованої енергомережі

|                 |      |                                                                  |                                                |                                            |      |
|-----------------|------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|------|
| Параметр мережі |      | Низька<br>потужність<br>ВЕС (до 10% у<br>структурі<br>генерації) | Середня потужність<br>ВЕС (10–30%)             | Висока<br>потужність ВЕС<br>(30% і більше) |      |
|                 |      | Практично не<br>впливає                                          | Помітні коливання при<br>раптових змінах вітру | Значні<br>коливання, ризик                 |      |
|                 |      |                                                                  | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01                       |                                            | Арк. |
|                 |      |                                                                  |                                                |                                            | 21   |
| Змн.            | Арк. | № докум.                                                         | Підпис                                         | Дата                                       |      |

| Параметр мережі                | Низька<br>потужність<br>ВЕС (до 10% у<br>структурі<br>генерації) | Середня потужність<br>ВЕС (10–30%)       | Висока<br>потужність ВЕС<br>(30% і більше)              |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                                |                                                                  |                                          | нестабільності                                          |
| Напруга в мережі               | Стабільна                                                        | Можливі локальні<br>просадки/перенапруги | Потрібні засоби<br>автоматичного<br>регулювання         |
| Реактивна<br>потужність        | Не критично                                                      | Можлива нестача в<br>окремих вузлах      | Необхідні<br>компенсатори<br>(STATCOM,<br>SVC)          |
| Інерція системи                | Зберігається<br>завдяки ТЕС                                      | Частково втрачається                     | Потрібна<br>віртуальна<br>інерція                       |
| Гармоніки та<br>якість енергії | Незначні                                                         | Потреба в фільтрації                     | Високий рівень<br>гармонік →<br>зниження якості         |
| Необхідність<br>балансування   | Низька                                                           | Помірна                                  | Висока потреба в<br>гнучких<br>резервних<br>потужностях |
| Надійність<br>енергопостачання | Висока                                                           | Може знижуватися без<br>резерву          | Потрібне<br>повноцінне<br>управління<br>мережею         |
| Інтеграція в<br>мережу         | Просте<br>підключення                                            | Потреба у координації з<br>диспетчером   | Вимагає<br>активного<br>управління,<br>прогнозування    |

#### 1. Частота мережі.

Невеликий обсяг ВЕС практично не впливає на частоту. Великий обсяг ВЕС з нестабільною генерацією може спричиняти коливання частоти через різку зміну навантаження (наприклад, раптове зменшення швидкості вітру). Можливе рішення: застосування акумуляторів, гнучких газових станцій або автоматизованих систем управління навантаженням.

#### 2. Напруга в мережі.

Надмірне виробництво ЕЕ може підвищувати напругу в певних ділянках мережі, недостатнє виробництво – знижувати її. Високий обсяг ВЕС особливо впливає на слабкі мережі, де регулювання складніше.

### 3. Реактивна потужність та стабільність.

ВЕС із інверторами не завжди здатні ефективно регулювати реактивну потужність. Недостатня підтримка реактивної потужності, як наслідок – зниження стабільності мережі та просадки напруги. Необхідне використання компенсаторів (STATCOM, SVC) або спеціальних інверторів з функцією управління VAR.

### 4. Інерція системи.

Традиційні ТЕС мають велику механічну інерцію (турбіни), яка погашає короточасні коливання. ВЕС (особливо з повною інверторною схемою) мають низьку або нульову інерцію, як наслідок – енергосистема стає чутливішою до збурень. Використовують віртуальну інерцію (synthetic inertia), що моделюється електронікою.

### 5. Гармоніки та якість ЕЕ.

Перетворювальне обладнання ВЕС (інвертори) може генерувати гармонійні спотворення, які погіршують якість ЕЕ. Особливо це критично при великій кількості ВЕУ, підключених до однієї ділянки мережі.

### 6. Необхідність балансування.

Через нестабільність вітру енергосистема повинна компенсувати дефіцит або надлишок генерованої потужності в режимі реального часу. Це підвищує вимоги до резервних потужностей, швидкодіючих джерел (ГЕС, акумулятори, швидкореагуючі газотурбінні установки) [16–17].

Загалом, чим більша встановлена потужність ВЕС у мережі, тим вищі вимоги до гнучкості, стабілізації параметрів, регулювання частоти, напруги та реактивної потужності. Для ефективної інтеграції ВЕС, енергосистема повинна адаптуватися технічно та організаційно, а оптимальний режим роботи ВЕС залежатиме від конкретних умов – технічних, економічних та географічних.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 23   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## **1.5 Аналіз систем електропостачання гірничо-збагачувальних комбінатів**

Система зовнішнього електропостачання представляє собою комплекс технічних пристроїв, що забезпечують передачу ЕЕ від джерела живлення до підстанцій гірничого підприємства, які включають підстанції глибокого вводу (ПГВ) і ЛЕП, а від них до ГПП. Ввід на ПГВ здійснюється класами напруги 35-220 кВ, в свою чергу, на ГПП – 6-220 кВ [18]. Системи електропостачання гірничих підприємств проектується відповідно до класифікації електроспоживачів за критерієм надійності електропостачання.

Відповідно до перерв у електропостачанні існують різні категорії споживачів ЕЕ, і загалом їх можна розподілити на – I, II, та III. Система електропостачання гірничорудних підприємств має здійснюватись мінімум двома ЛЕП від двох джерел живлення незалежних одне від одного (незалежно від величини напруги). Всі живлячі ЛЕП мають знаходитися під навантаженням [5, 19].

ГПП, котрі входять до складу системи електропостачання гірничих підприємств, представляють розподільчу трансформаторну підстанцію, в якій встановлюється 2 трансформатори. Потужність кожного, окремо взятого з них, має забезпечити 100 % навантаження, або ж при аварійному відключенні 1 трансформатора, має забезпечуватись живлення споживачів ЕЕ I кат. та основних споживачів II кат. протягом часу ліквідації аварії [19].

Електропостачання гірничих підприємств при відкритих виробках має специфіку. Кар'єри – електрифіковані гірничі підприємства, встановлена одинична потужність електроприймачів яких сягає десятків МВА. Характерною їх особливістю є розташування електроспоживачів на значних площах та постійне переміщення екскаваторів, бурових верстатів, які піддаються механічним впливам при вибухах, пересуваннях і т.д. Для живлення споживачів ЕЕ застосовується напруга 6-10 кВ та 0,4 кВ.

Система електропостачання кар'єра включає такі основні компоненти: одну або кілька ГПП, центральний розподільний пункт (ЦРП), кар'єрні лінії

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 24   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

електропередач, кар'єрні розподільчі пункти (КРП), пересувні установки трансформаторного підключення (УТП), перемикальні пункти (ПП) та проміжні захисні пункти. Схеми розподільних мереж кар'єра класифікуються як радіальні, магістральні або комбіновані. Залежно від просторового розташування ліній електропередач відносно фронту гірничих робіт, їх поділяють на подовжні та поперечні.

Пересувні споживачі ЕЕ отримують живлення від повітряних ЛЕП за допомогою гнучких кабелів через стаціонарні або мобільні перемикальні пункти, розміщені з інтервалом 200-300 метрів [5, 18].

У поперечній схемі електроприймачі та трансформаторні підстанції кар'єра підключаються до ПП, що живляться від поперечних ліній, з'єднаних зі стаціонарними ЛЕП, прокладеними вздовж бортів кар'єра поза межами зони розробки. Комбінована схема електропостачання кар'єра є відкритою бортокільцевою системою, яка включає як повітряні, так і кабельні ЛЕП. Така конфігурація забезпечує одно- або двостороннє живлення з можливістю паралельної роботи ЛЕП.

Внутрішня система електропостачання збагачувальних фабрик включає сукупність цехових підстанцій, розподільчих пунктів, розподільчих установок, а також кабельних і повітряних ліній, розміщених у межах промислового майданчика. Цехові підстанції та РП напругою 6-10 кВ, як правило, прилягають до основного технологічного корпусу [5].

Розподіл ЕЕ в межах виробничих корпусів здійснюється за радіальними, магістральними або комбінованими схемами, серед яких найбільше поширення отримали варіанти з шинними магістралями. РП головних і цехових підстанцій, як правило, виконуються двосекційними та обладнані пристроями АВР.

Збагачувальні фабрики – це високо механізовані виробництва, де потужність технологічного обладнання складає 100-150 МВА. Ці енергоємні технічні машини згруповані в декілька паралельних технологічних ліній, що функціонують у визначеній послідовності. Така організація вимагає високої надійності та жорстких вимог до систем електропостачання.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 25   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Як вже зазначалося, понад 30 % загального промислового споживання електроенергії в Україні припадає на гірничорудну галузь [4, 12, 20]. У зв'язку з цим таке енергетичне навантаження суттєво впливає на економічну ефективність таких підприємств, що зумовлює необхідність впровадження заходів зі зниження показника енергоємності процесів видобутку залізної руди. Отже, енергетична проблема гірничорудних підприємств є загальнодержавною і вимагає прийняття відповідних системних та комплексних заходів.

Можна виділити один із ефективних напрямів зниження енергоємності процесу видобутку залізорудної сировини є інтеграція автономних джерел живлення в систему електропостачання таких підприємств. Як показують дослідження [6, 10, 12, 21], ці підприємства мають у своєму розпорядженні достатні власні енергетичні ресурси для реалізації подібних рішень [20].

Зокрема, використання вітрових генераторів у складі систем електропостачання промислових об'єктів формує новий тип енергетичних систем – системи з джерелами розподіленої генерації ЕЕ [6, 8, 10, 12, 21].

Запровадження ДРГ сприятиме скороченню втрат електроенергії у внутрішніх електричних мережах, які наразі можуть досягати до 30 % (рис. 1.5), а також знизить витрати на її споживання, оскільки електроенергія, вироблена з власних ресурсів, є дешевшою за централізовану. Крім того, це дозволить підвищити надійність та безперервність електропостачання.

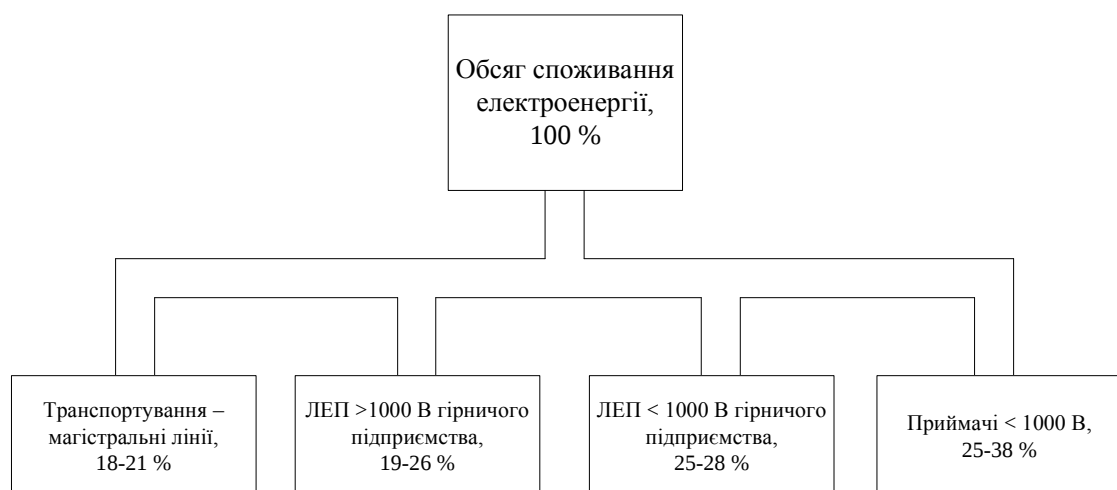


Рисунок 1.5 – Втрати ЕЕ в системі електропостачання-електроспоживання

Енергетичні витрати складають значну частку в собівартості продукції ГЗК – до 27–32%. Водночас навантаження силових трансформаторів на ГПП становить менше 20 % від їх номінальної потужності (тобто коефіцієнт завантаження – менше 0,2), а втрати ЕЕ у внутрішньоцехових мережах сягають 25-30% (рис. 2.1).

Ще більші втрати спостерігаються в мережах напругою до 1 кВ, особливо тих, що живлять віддалених споживачів. Такі ЛЕП можуть досягати десятків кілометрів протяжності [4, 9] і є одними з найменш ефективних з точки зору енергозбереження. У цій ситуації особливого значення набуває використання автономних джерел живлення, зокрема поновлюваних джерел енергії, як засобу підвищення енергоефективності.

Одним із перспективних напрямів модернізації системи електропостачання ГЗК є впровадження джерел розосередженої генерації на основі ВЕУ [6, 10, 12, 21]. У зв'язку з цим важливим завданням є реалізація ВЕС у виробничих умовах ГЗК, а також розробка методів і пристроїв керування електротехнічним комплексом ВЕС, здатного ефективно працювати в широкому діапазоні швидкостей вітру та забезпечувати належну якість генерованої ЕЕ.

### ***1.6 Особливості підключення вітроенергетичних станцій до електричних мереж гірничорудних підприємств***

Згідно [15, 22–23] структура, параметри та елементи схем електричних з'єднань ВЕУ залежать від низки чинників: одиничної потужності турбін, їх кількості, просторового розміщення, типу використовуваних генераторів ЕЕ та наявності статичних перетворювачів.

ВЕС фактично функціонує як локальна розподільна мережа з ЕЕ, що надходить у зворотному напрямку. Залежно від зазначених вище параметрів, її з'єднувальна мережа може мати магістральну, радіальну або комбіновану структуру. Розміщення окремих установок і відстань між ними визначаються

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 27   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

переважно двома чинниками: одиничною потужністю турбін і характером рози вітрів на обраному майданчику [15, 23].

Наразі у складі ВЕС найбільш широкого поширення набули ВЕУ з одиничними потужностями 1,5-3,5 МВт та напругою 660-690 В з діаметрами вітротурбіни близько 60-90 м.

Прості розрахунки [23–24] свідчать, що за наведених потужностей генераторів і довжин кабельних з'єднань, ефективна економічна робота мережі ВЕС можлива лише за умови використання підвищених робочих напруг. Зазвичай сучасні мережеві ВЕУ оснащуються власним підвищувальним трансформатором, а взаємне з'єднання турбін виконується на стороні середньої напруги в діапазоні від 6 до 30 кВ [23–24].

На рис. 1.6 наведено варіанти радіальних схем ВЕС на базі ВЕУ з різними варіантами електрогенераторів.

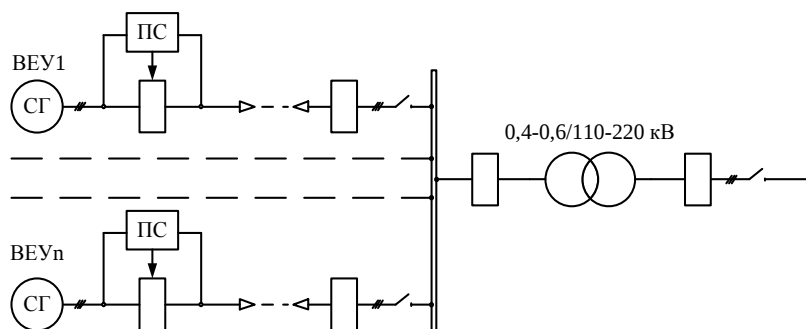


Рисунок 1.6 – ВЕС невеликої потужності на базі ВЕУ із СГ

Якщо в системі відсутні статичні перетворювачі, а частота обертання валу установки стабільна й кратна частоті мережі, то для вітроелектростанцій на основі ВЕУ з синхронними генераторами можливі кілька варіантів підключення [23–24]:

- кожен генератор оснащується окремим пристроєм синхронізації;
- генератори спочатку синхронізуються між собою в межах груп за допомогою автоматичних пристроїв, після чого групи синхронізуються з мережею;
- спочатку відбувається синхронізація генераторів у групах, потім – між самими групами, в свою чергу з мережею – на ГПП.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 28   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Логічно, що найбільше відповідає вимогам експлуатації саме перший варіант, оскільки він дає змогу звести до мінімуму кількість необхідних пристроїв синхронізації. У цьому випадку кожен генератор, незалежно від інших, приєднується до мережі, а під час повторного післяаварійного запуску синхронізується одна група генераторів на ГПП першого рівня [23].

Як зазначено в роботах [15, 23–24], недоліками цього підходу є часта необхідність синхронізації ВЕУ під час підключення до мережі, а також зниження виробітку ЕЕ, пов'язане з фіксованою частотою обертання вітротурбіни. Синхронізацію доводиться виконувати щоразу після відключення ВЕУ через недостатню або надмірну швидкість вітру, а також після планових технічних обслуговувань і ремонтів.

Водночас використання АГ дозволяє усунути з головної схеми ВЕС необхідність у синхронізуючих пристроях. Однак це потребує компенсації реактивної потужності, яка або споживається з мережі, або потребує додаткового встановлення компенсуючого обладнання [15, 23–24].

Компенсуючі пристрої можуть встановлюватися безпосередньо біля кожного генератора, для кожної групи генераторів або централізовано — на підвищувальній підстанції другого рівня (рис. 1.7). Для плавного підключення ВЕУ до мережі після досягнення вітротурбіною синхронної швидкості обертання у таких схемах застосовуються керовані тиристорні вентиля [25].

Подібні схеми підключення також можуть використовуватись для ВЕУ на базі двошвидкісних АГ або генераторів із фазним ротором і регульованим ковзанням. Проте такі машини здебільшого застосовуються у складі потужніших ВЕУ, які підключені через підвищуючі трансформатори [15, 23–24].

У разі, якщо ВЕУ в складі ВЕС мають змінну частоту обертання вітротурбін і використовують АГ з короткозамкненим ротором (КЗ) або СГ зі змінною частотою обертання, передача всієї виробленої ЕЕ до мережі здійснюється через статичний перетворювач частоти (рис. 1.8) [23].

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 29   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

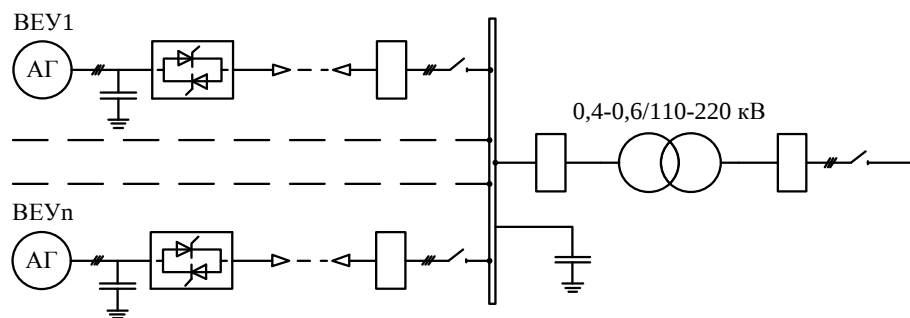


Рисунок 1.7 – ВЕС невеликої потужності на базі ВЕУ з АГ з КЗ

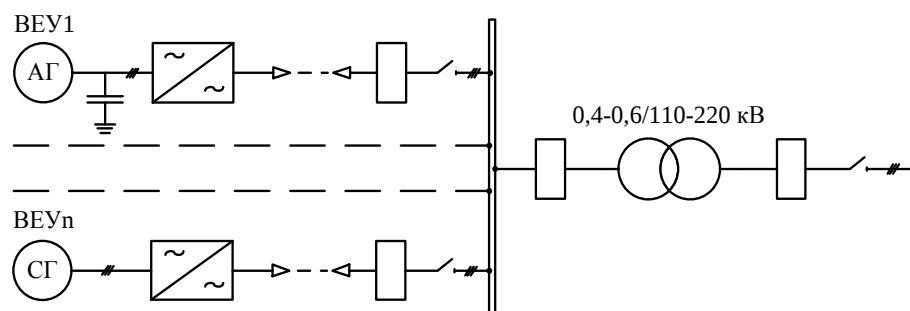


Рисунок 1.8 – ВЕС невеликої потужності на базі ВЕУ з АГ або СГ змінної частоти обертання

За умови сприятливого розподілу напрямків вітру декілька ВЕУ підключаються до спільного трансформатора (рис. 1.9).

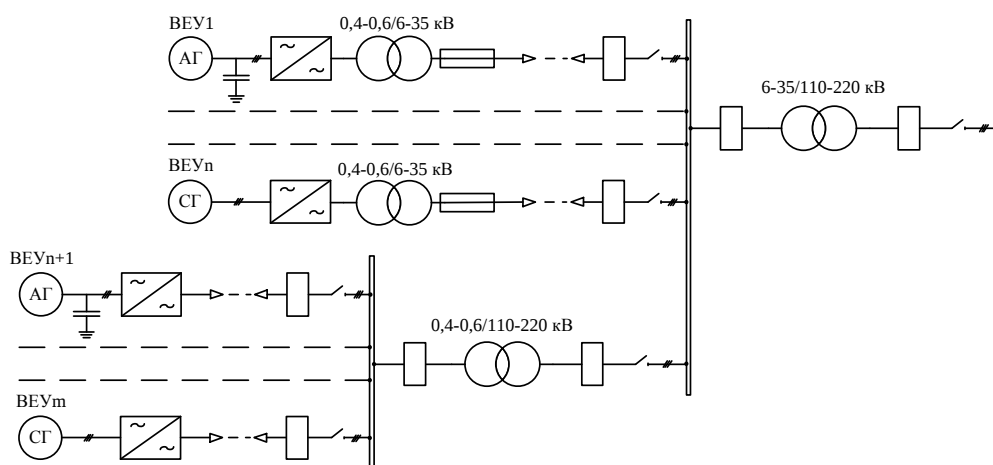


Рисунок 1.9 – Складнорозгалуджена радіальна схеми ВЕС

Варто зазначити, що використання ВЕУ, які відрізняються за принципом роботи, конструкцією та типом генераторів, зазвичай має місце лише під час модернізації вже існуючих ВЕС [15, 23]. Виходячи з експлуатаційних

міркувань, у нових ВЕС використовуються ВЕУ однакових конструкції і типорозміру [15, 23–24].

Специфіка розташування [26] та підключення ВЕС до розподільчих мереж [6, 10] ГЗК вимагає детального аналізу режимів роботи ВЕС в цих умовах.

### ***1.7 Розробка алгоритму функціонування електротехнічного комплексу вітроенергетичної станції***

Існує декілька режимів роботи ВЕС: автономний, локальний та на централізовану електромережу підприємства, тобто підключення до найближчої ГПП (за критерієм мінімуму втрат ЕЕ) [6, 10, 15, 27].

Автономний режим – живлення споживачів ЕЕ без участі централізованої мережі, або ж коли з усієї ВЕС, за якихось певних причин, працездатною є тільки одна ВЕУ (рис 3.14). Локальний режим передбачає роботу ВЕС спільно з централізованою системою електропостачання на живлення споживача, при цьому ВЕС виступає основним і пріоритетним джерелом ЕЕ.

Алгоритм роботи системи керування електропостачанням ГЗК з використанням ВЕС може мати таку послідовність дій (рис. 1.10).

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 31   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |



Окрім цього, система передбачає можливість автономної роботи ВЕС. Такий режим активується у двох випадках: коли виробленої енергії достатньо для живлення конкретного споживача, або коли за певних причин відбувається аварійне відключення централізованої мережі підприємства, а бо ж коли її параметри виходять за межі норми. У подібних умовах ВЕС переходить у

локальний режим роботи із постійним моніторингом параметрів. Після стабілізації стану мережі станція може залишитись у локальному режимі або відновити роботу в складі загальної енергомережі.

У разі, коли обсяг виробництва ЕЕ перевищує потреби споживачів у локальному режимі, надлишок може використовуватись для заряджання акумуляторних батарей, що виконують функцію балансування навантаження, або передаватись до централізованої енергосистеми.

Якщо потужність генерації виявляється нижчою за потужність навантаження, подальші дії залежать від режиму:

- в автономному режимі: підключаються насамперед споживачі першої категорії, після чого здійснюється повторна перевірка параметрів. За умови нестачі потужності здійснюється часткове відключення менш критичних споживачів ЕЕ;

- у локальному режимі: нестачу енергії компенсує централізована система живлення.

Такий підхід дозволяє ефективно управляти ресурсами, зменшити втрати електроенергії, підвищити енергетичну ефективність і забезпечити безперебійне електропостачання ключових технологічних процесів підприємства.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.01 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 33   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

### 2.1 Загальні питання вибору генератора для вітроенергетичної установки

У низці наукових досліджень з даної тематики [6, 10, 28] розглядалися, оцінювалися та пропонувалися різні варіанти побудови електромеханічних комплексів ВЕУ. Пошук оптимальних або близьких до оптимальних рішень триває постійно, оскільки обраний технічний варіант значною мірою визначає загальну ефективність роботи всього вітроенергетичного комплексу.

На сьогодні, за сукупністю техніко-економічних показників, найпоширенішими для ВЕУ є АГ з КЗ [15, 29]. Такі генератори підключаються до електромережі безпосередньо (рис. 2.1). Застосування АГ із КЗ дозволяє зменшити витрати на додаткові системи управління, оскільки для асинхронних машин не вимагається висока точність у підтриманні частоти обертання вітроколеса, а сам генератор легше синхронізується з мережею [31].

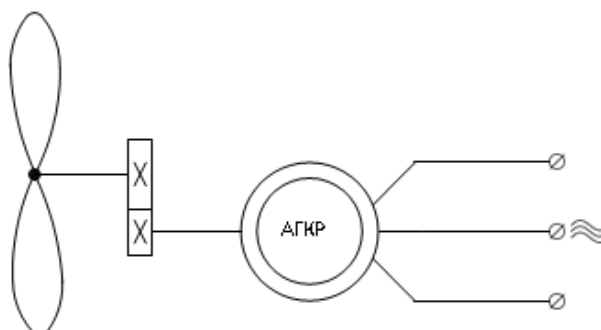


Рисунок 2.1 – Схема підключення ВЕУ із використанням АГ з КЗ

Альтернативним варіантом застосування АГ з КЗ у складі ВЕУ є схема з безпосереднім частотним перетворювачем (рис. 2.2). Такий підхід забезпечує розширені можливості для генерації ЕЕ та покращення ряду її параметрів, оскільки дозволяє використовувати АГ у генераторному режимі навіть при

|           |              |          |        |      |                          |  |  |      |      |         |    |
|-----------|--------------|----------|--------|------|--------------------------|--|--|------|------|---------|----|
|           |              |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.02 |  |  |      |      |         |    |
|           |              |          |        |      |                          |  |  |      |      |         |    |
| Змн.      | Арк.         | № докум. | Підпис | Дата |                          |  |  |      |      |         |    |
| Розробив  | Радейко Д.І. |          |        |      | Розділ 2                 |  |  | Літ. | Арк. | Акрушів |    |
| Перевірів | Дозоренко    |          |        |      |                          |  |  |      |      | 33      | 15 |
|           |              |          |        |      |                          |  |  |      |      |         |    |
| Н. Контр. | Дозоренко    |          |        |      |                          |  |  |      |      |         |    |
| Затвердж. | Федотов В.О. |          |        |      | КНУ<br>гр. ЕЕМ-21-2      |  |  |      |      |         |    |

обертах нижче синхронних [30–31].

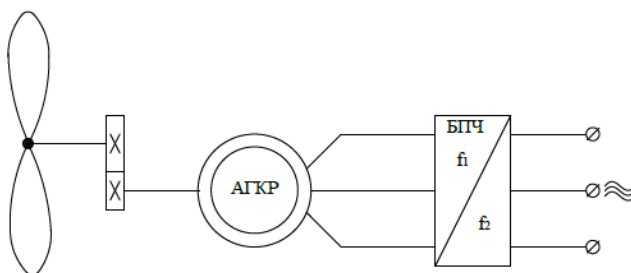


Рисунок 2.2 – Схема підключення ВЕУ з використанням АГ з КЗ і безпосереднього перетворювача частоти

Втім, застосування асинхронної машини у складі ВЕУ має ряд недоліків [15, 30–31], зокрема:

- при однакових вітрових умовах вона виробляє менше ЕЕ порівняно із СГ;
- характеризується нижчим коефіцієнтом потужності через значні струми намагнічення, які зростають пропорційно до квадрата напруги;
- споживає з мережі індуктивну реактивну потужність, що вимагає впровадження компенсуючих пристроїв;
- має обмежені можливості регулювання швидкості обертання ротора, зводячи керування до зміни аеродинамічних характеристик вітроколеса або до варіювання передаточного числа мультиплікатора, що, в свою чергу, знижує загальний ККД установки.

Одним з варіантів побудови енергоорієнтованих електромеханічних комплексів для ВЕУ є використання АГ з ємнісним збудженням [25, 33]. Оскільки такий генератор за своєю конструкцією аналогічний АД з КЗ, він успадковує всі переваги цієї машини порівняно з іншими типами генераторів – насамперед, нижчу вартість виробництва та високу надійність у роботі завдяки відсутності ковзних контактів [30–32].

Цей фактор набуває особливого значення з огляду на те, що гондола вітрогенератора з електричною машиною зазвичай розміщується на великій

висоті, що ускладнює доступ обслуговуючого персоналу для проведення технічного обслуговування.

Найвразливішими компонентами електромеханічної системи ВЕС залишаються підшипникові вузли вентилятора та електричного генератора, а також система регулювання кута нахилу лопатей. Враховуючи, що ротор АГ обертається на постійно високих обертах, значно перевищуючи швидкість обертання лопатей (які можуть залишатися нерухомими навіть при сталому вітрі), стає очевидним, що зношування підшипників генератора відбувається інтенсивніше, ніж у системі повороту лопатей. У зв'язку з цим доцільним виглядає варіант розміщення генератора окремо від гондоли – зокрема, на рівні, максимально наближеному до землі, що спрощує технічне обслуговування.

Таким чином, у загальному випадку, надійність і тривалість експлуатації ВЕС значною мірою визначається станом підшипникових вузлів обертових компонентів, за умови належного проектування електротехнічної частини системи. Для підвищення надійності рекомендується використовувати виключно безконтактні елементи, зокрема у комутаційних пристроях.

## ***2.2 Модель вітроенергетичної установки з асинхронним генератором з ємнісним збудженням***

Основні труднощі в експлуатації електромеханічних комплексів ВЕУ, як правило, виникають не під час роботи АГ в складі зовнішньої (централізованої) енергосистеми, а саме при його функціонуванні в автономному режимі електропостачання [25, 32]. Відомо, що в таких умовах необхідно забезпечити стабільність частоти та амплітуди вихідної напруги в межах допустимих значень [25, 32]. На рисунку 2.3 нижче представлена функціональна схема ВЕУ подібного типу:

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.02 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 36   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

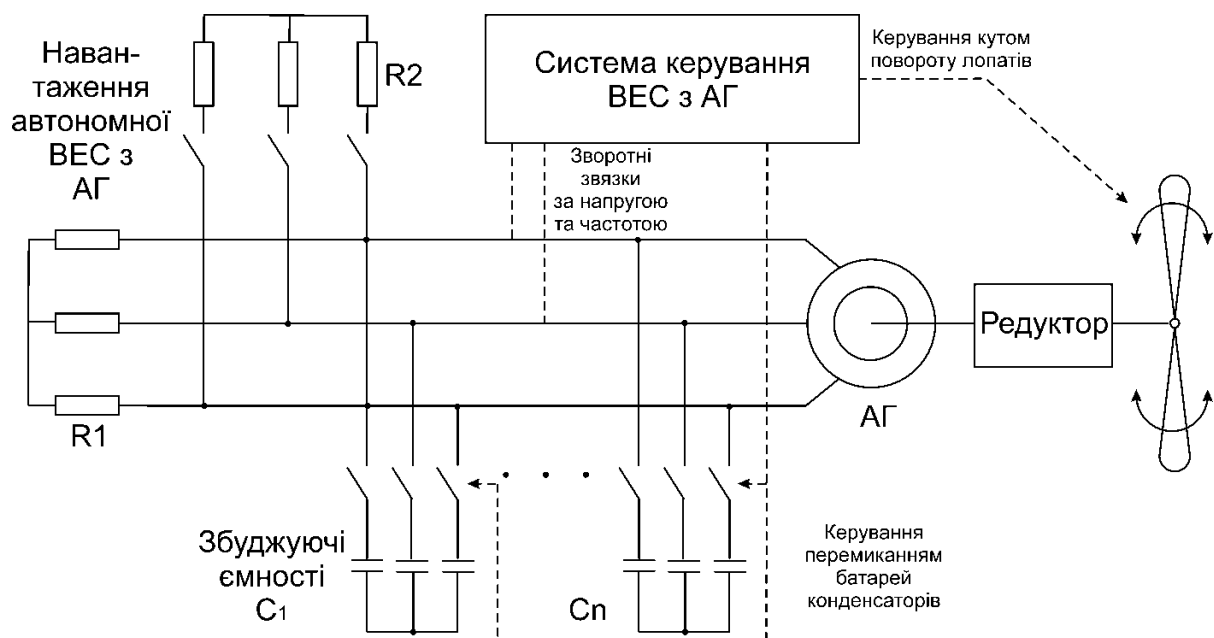


Рисунок 2.3 – Функціональна схема автономної ВЕУ з АГ

З метою аналізу роботи таких систем в автономному режимі була створена модель вітроелектричної машини разом із допоміжним обладнанням (рис. 2.4), на основі якої отримано графіки зміни швидкості обертання (частоти) та вихідної напруги АГ за різних умов експлуатації.

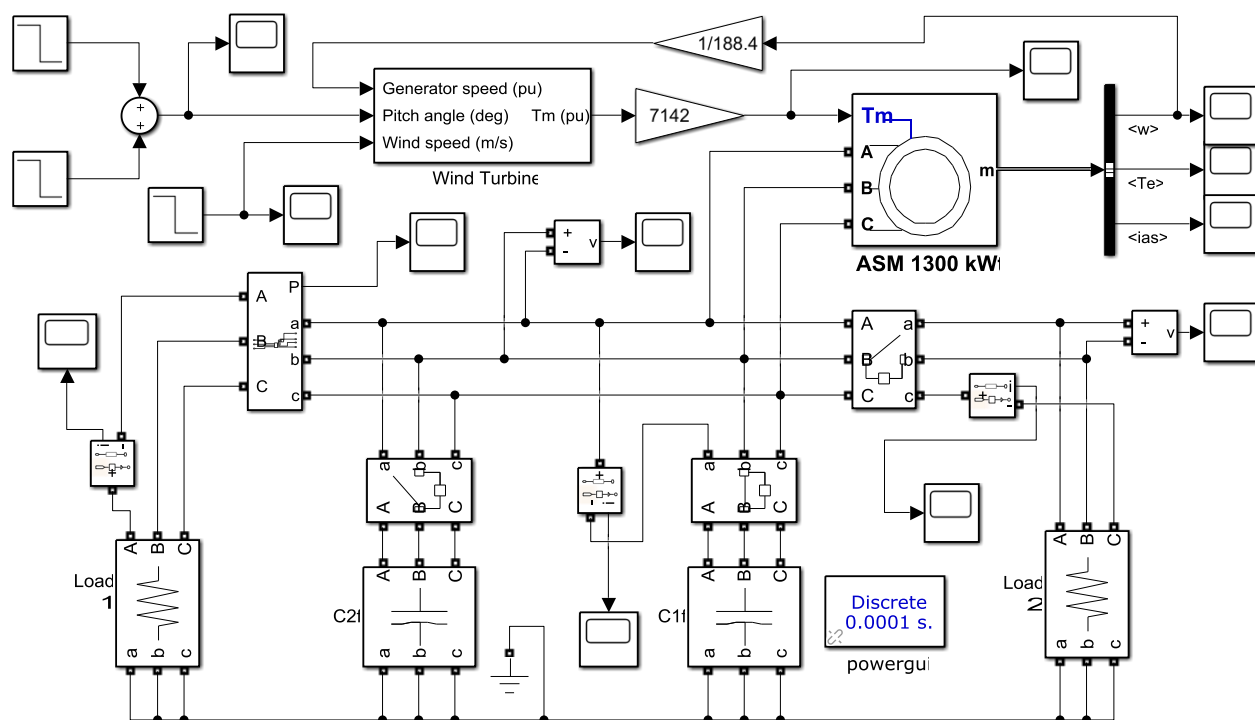


Рисунок 2.4 – Структура моделі ВЕУ з АГ з ємнісним збудженням у складі ВЕС

У запропонованій структурі застосовується асинхронна машина з номінальною потужністю 1300 кВт та напругою на статорі 4160 В, 50 Гц, яка взята з бібліотеки MATLAB. Для моделювання вітрогенератора також використано компонент Wind Turbine з бібліотеки MATLAB. Його параметри включають номінальну механічну потужність 1,5 МВт та базову швидкість вітру 12 м/с. Турбінна характеристика для кута нахилу лопатей 0 градусів наведена на рис. 2.5:

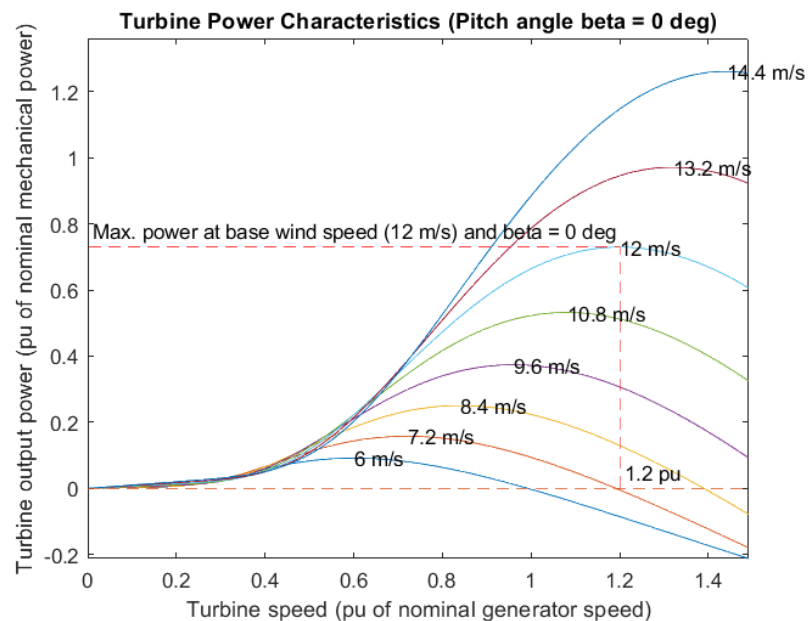


Рисунок 2.5 – Характеристики турбіни при куту лопатей 0 град.

### 2.2.1 Дослідження динаміки вітроенергетичної установки в автономному режимі

За допомогою розробленої моделі (рис. 2.4) було проведено моделювання перехідних процесів у вітроелектроустановці, що працює в автономному режимі, при різкому зменшенні швидкості вітру та раптовому збільшенні активного навантаження [25, 32]. На основі отриманих результатів проаналізовано способи компенсації впливу цих збурень. На рисунку 2.6 зображено перехідні процеси, що виникають внаслідок порушення режиму генерації асинхронного генератора, а також динаміку його відновлення до номінального режиму. У якості номінальних параметрів генерації прийнято

лінійну напругу 2000 В і частоту обертання генератора – 188,4 об/хв (відповідає 50 Гц).

Аналіз отриманих графіків свідчить про таке: при зниженні швидкості вітру на 10-й секунді (з 15 до 10 м/с) спостерігається зменшення частоти обертання генератора (з 190 до 145 об/хв) та зниження вихідної напруги (з 2000 до 100 В). Відновити ці параметри до початкових значень (190 об/хв і 2000 В) можливо шляхом зменшення кута повороту лопатей турбіни на 20-й секунді – з 25 до 12 градусів.

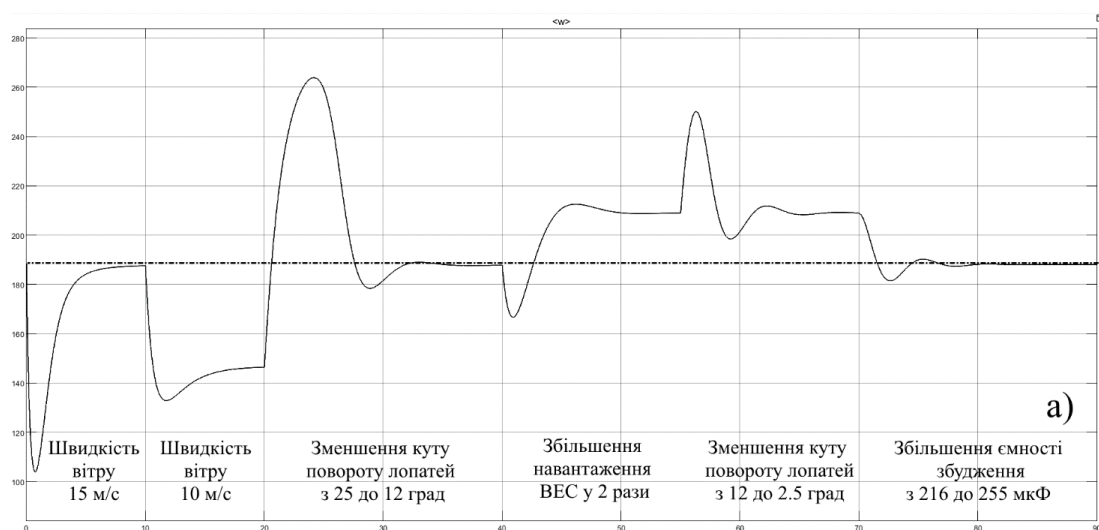


Рисунок 2.6 – Графік швидкості АГ за різних умов

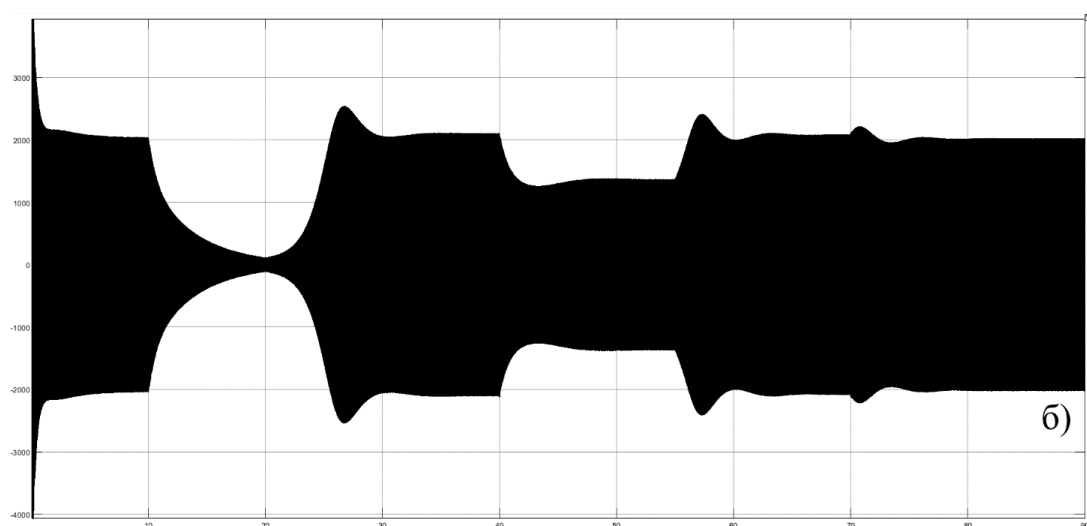


Рисунок 2.7 – Графік напруги АГ

Збільшення навантаження на ВЕС у два рази на 40-й секунді призводить до зростання швидкості обертання асинхронного генератора (АГ) до 210 об/хв (що на 11,7 % вище від номінального значення) і до зниження напруги до 1300 В (на 35 % нижче від номінального значення). Спроба стабілізувати параметри шляхом подальшого зменшення кута повороту лопатей на 55-й секунді (на 9,5°) дозволяє відновити напругу до номінального рівня, однак швидкість обертання залишається надмірною – фактично незмінною (210 об/хв). Щоб знизити швидкість до допустимого рівня, на 70-й секунді потрібно збільшити ємність збудження генератора шляхом додаткового підключення батареї конденсаторів. При цьому напруга зберігається майже на рівні 2000 В.

Таким чином, було виявлено чотири основні канали впливу на робочі режими ВЕС з АГ із ємнісним збудженням [25, 32]:

- зміна швидкості вітру;
- зміна кута повороту лопатей;
- зміна навантаження ВЕС;
- зміна ємності збудження АГ.

Перший і третій канали чинять випадковий вплив на систему, тоді як другий і четвертий можуть використовуватися для його компенсації. У підсумку, структура системи управління передбачає наявність двох контрольованих керуючих каналів і двох випадкових збурювальних впливів. Це зумовлює необхідність створення автоматизованої системи управління, здатної підтримувати стабільну частоту та напругу генератора. Зрозуміло, що така система має включати два контури зворотного зв'язку – за напругою і частотою обертання генератора [15, 25, 31–32].

Моделювання показало, що навіть із використанням нескладних технічних засобів можна досягти прийнятного рівня регулювання частоти та напруги АГ. Наприклад, при поступовому зниженні швидкості вітру протягом 10 секунд поведінка системи наведена на рис. 2.8:

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.02 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 40   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

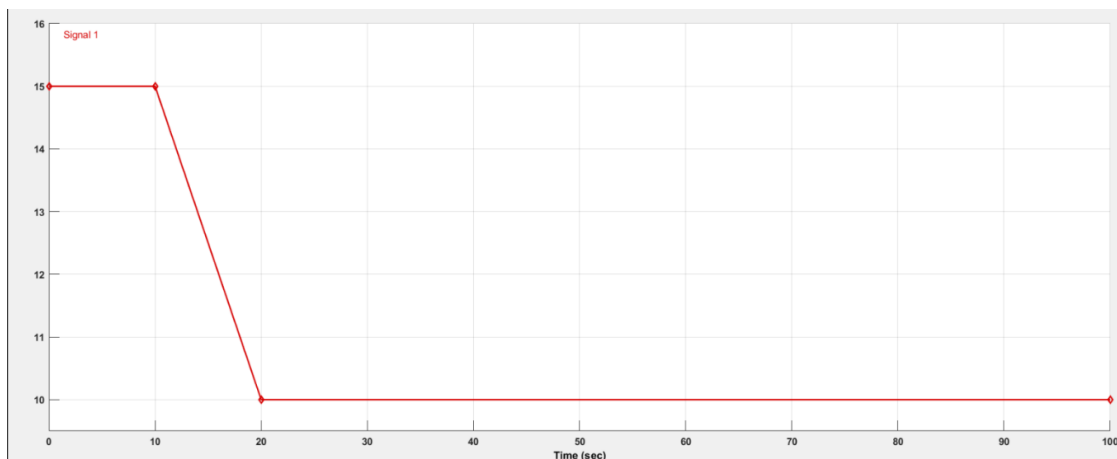


Рисунок 2.8 – Графік зміни швидкості вітру

У разі одночасного зменшення кута повороту лопатей від 25 до 12 градусів аналогічним способом, спостерігатимуться перехідні процеси за швидкістю ротора та напругою статора АГ (рис. 2.9 і 2.10):

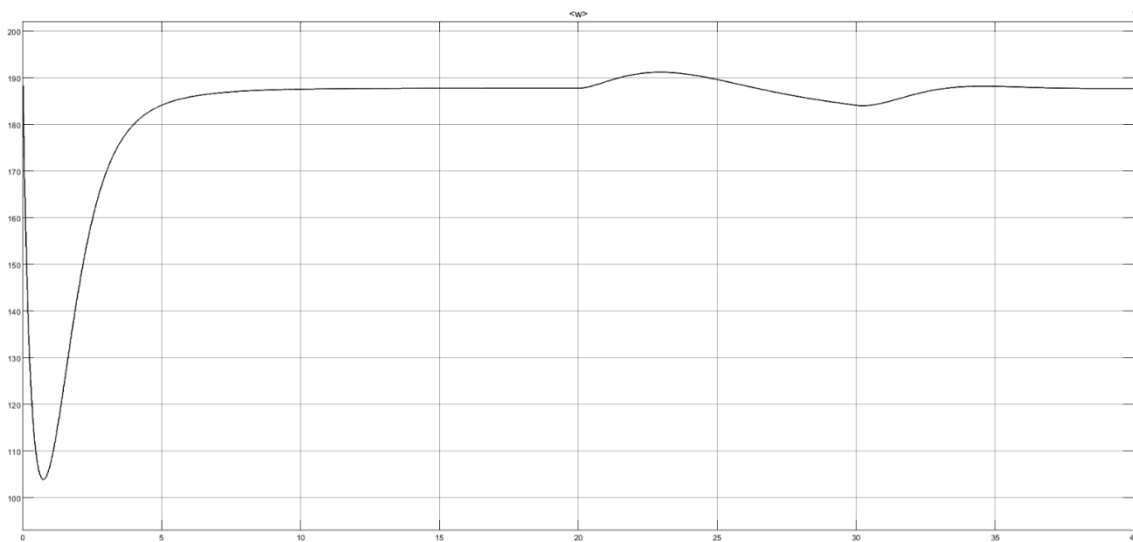


Рисунок 2.9 – Графік швидкості ротору АГ

Перші 5 секунд перехідного процесу відповідають втягуванню АГ у сталий режим за довільних початкових умов, тому цей фрагмент графіка не має прямого стосунку до предмета дослідження вказаної статті. Починаючи з 20-ї до 35-ї секунди, АГ починає реагувати на комбіновану дію зміни швидкості вітру та кута повороту лопатей – спостерігаються коливання частоти в межах від 184 до 192 рад/с при номінальній швидкості 188 рад/с. Відхилення частоти не перевищує 2,17% [25, 32]. На рисунку 4.8 зображено напругу на статорі АГ:

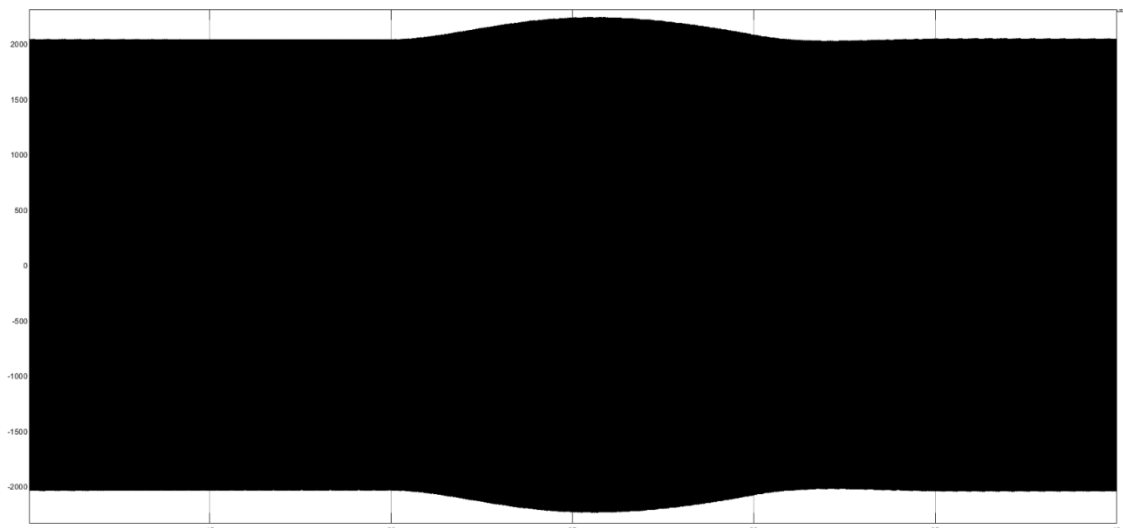


Рисунок 2.10 – Графік напруги статора АГ

Як видно з рис. 2.10, на 25-й секунді амплітуда вихідної напруги генератора перевищує номінальне значення на 11,2%. Порівняно з даними на рис. 4.4 (перші 40 секунд) спостерігається помітне покращення. Водночас, обидва ці показники виходять за межі допустимих значень, установлених стандартами якості електроенергії для мереж загального користування. Проте вони можуть відповідати вимогам до якості електропостачання в локальних мережах, де припустимі перехідні відхилення напруги до  $\pm 20\%$ , а частоти — до  $\pm 7,5\%$  при різких змінах симетричного навантаження [33]. З аналізу випливає, що система керування кутом повороту лопатей має бути істотно нелінійною, аби забезпечити утримання параметрів частоти й напруги генератора в допустимих межах (до 0,8% за частотою та до 10% за амплітудою напруги).

Крім того, якщо на 40-й секунді подвоїти активне навантаження, одночасно змінити кут повороту лопатей до 9,5 градусів і збільшити ємність збудження генератора з 216 мкФ до 255 мкФ, можна отримати перехідний процес за швидкістю, що зображений на рис. 2.11.

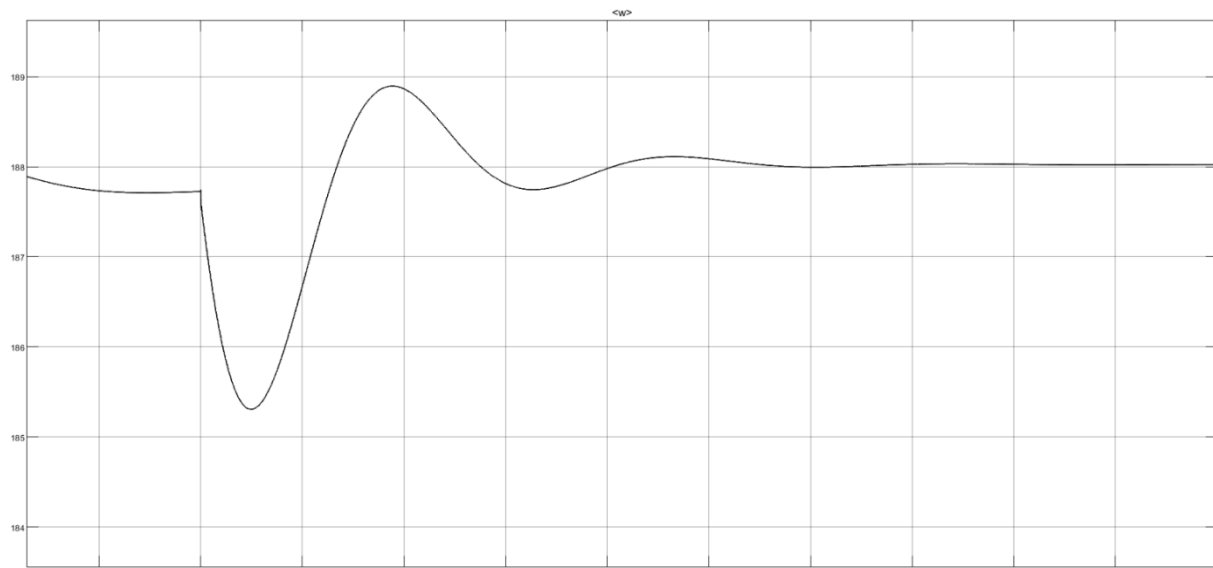


Рисунок 2.11 – Перехідний процес зміни швидкості за умов підключення навантаження та одночасного застосування ступінчастих коригувальних впливів

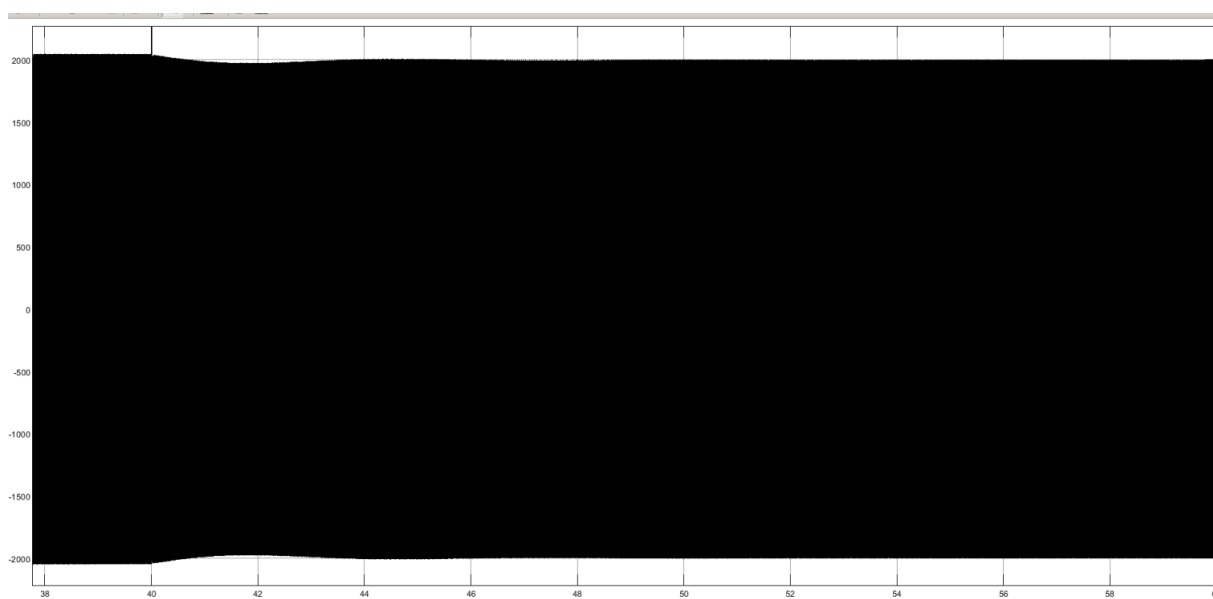


Рисунок 2.12 – Графік напруги АГ при підключенні навантаження та одночасного застосування ступінчастих корегувальних впливів

З рисунків видно, що максимальне відхилення за швидкістю складає 1,6 %, а зниження напруги на 2.3 %. Тобто, за показниками якості ЕЕ, структура ВЕУ з АГ відповідає стандарту локальних мереж із автономними джерелами ЕЕ, а стандарту централізованих мереж загального користування – ні [25, 32].

### 2.2.2 Дослідження динаміки вітроенергетичної установки разом з енергосистемою

Далі приведені дослідження роботи АГ ВЕУ у складі енергосистеми, тобто приєднанням автономної ВЕУ (рис. 2.4) до централізованої енергосистеми (рис. 2.13).

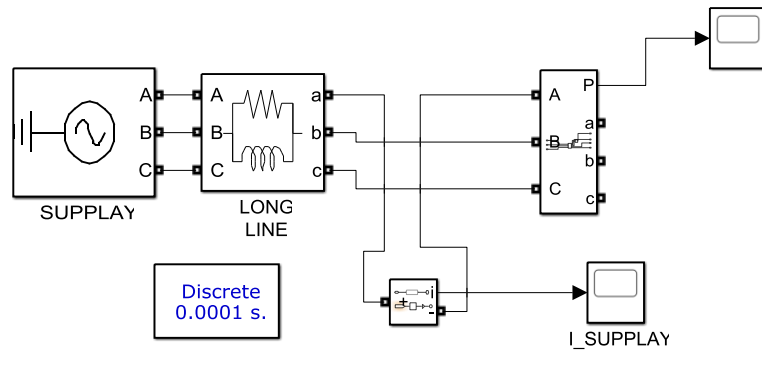


Рисунок 2.13 – Частина енергосистеми до приєднання до моделі з рис. 2.4.

Початкові умови для аналізу динаміки відповідають тим, що були використані під час побудови графіків на рисунках 4.7–4.10. У результаті моделювання отримано графіки перехідних процесів за інших рівних умов у режимі сумісної роботи з енергосистемою (рис. 2.14–4.15).

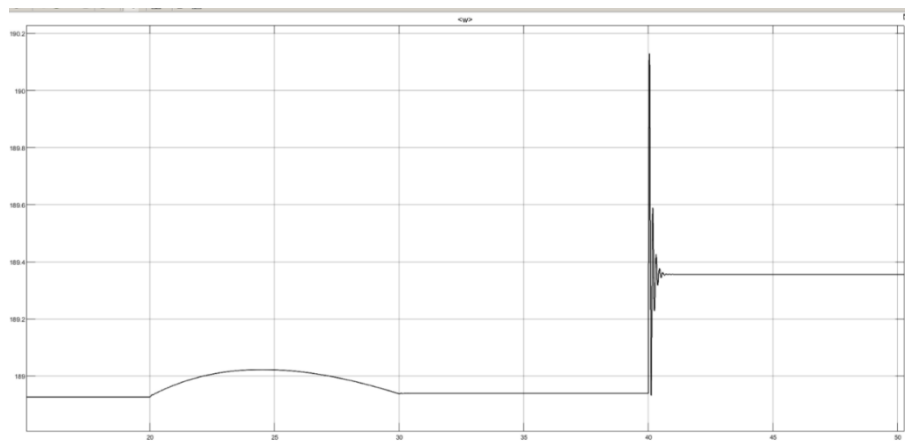


Рисунок 2.14 – Графік швидкості АГ при спільній роботі з енергосистемою



Рисунок 2.15 – Графік напруги АГ при спільній роботі з енергосистемою

Як показують наведені графіки, в інтервалі від 20 до 30 секунд (при зниженні швидкості вітру та одночасному коригуванні кута повороту лопатей) напруга на виході АГ залишається практично сталою, а швидкість обертання змінюється плавно та незначно, з короткочасним підвищенням на 0,05%. На 40-й секунді, у момент різкої зміни навантаження та супутніх коригувальних впливів, швидкість АГ зростає більш різко – до відхилення 0,57%, після чого стабілізується на рівні, що перевищує початкове значення на 0,24%.

На рис. 2.16 подано графіки активної потужності АГ та енергосистеми. Вони свідчать про добру збалансованість режимів роботи: майже вся активна потужність АГ споживається місцевим навантаженням, а перетоки потужності між АГ та енергосистемою відсутні. Лише короткочасно спостерігається відбір активної потужності з енергосистеми з піком до -50 кВт і сталим рівнем -7...-8 кВт. Надалі, на 40-й секунді, при двократному збільшенні навантаження, відбувається короткочасний накид потужності до 200 кВт, після чого перетоки з енергосистемою зникають.

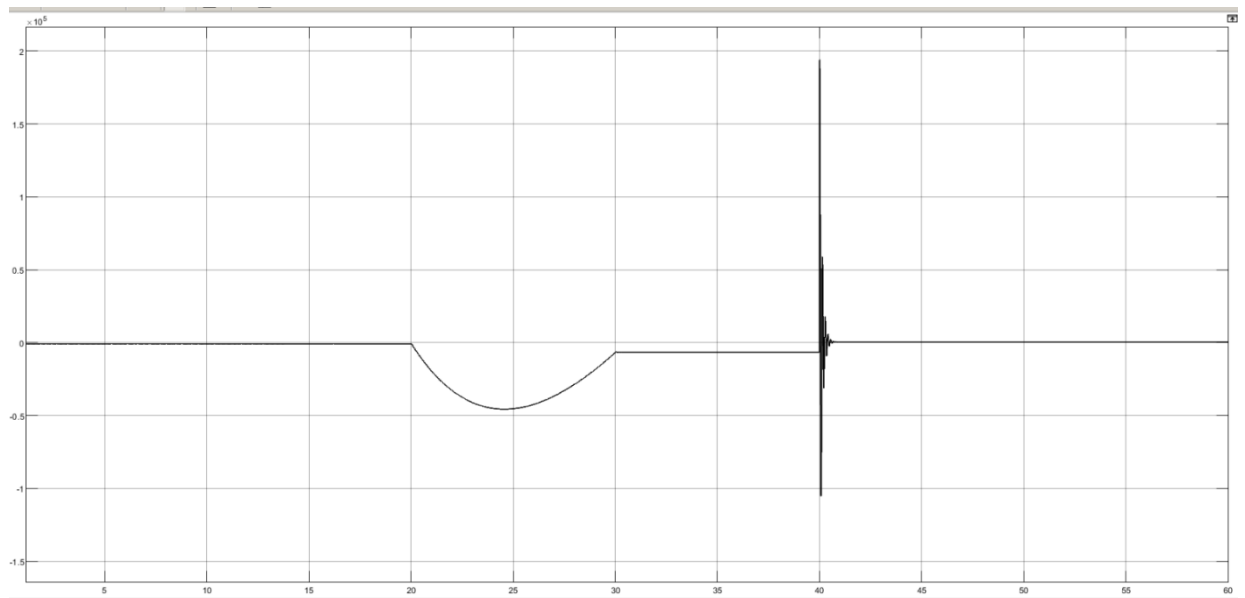


Рисунок 2.16 – Графік потужності енергосистеми

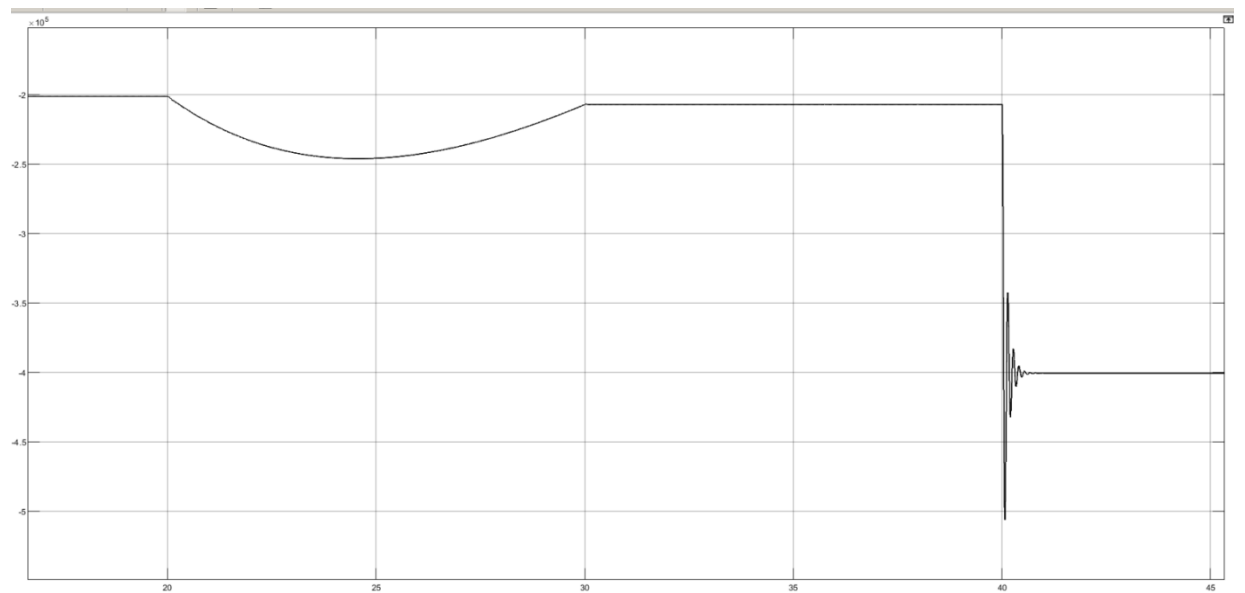


Рисунок 2.17 – Графік потужності АГ при спільній роботі з енергосистемою

Як видно з рис. 2.17, АГ повністю забезпечує споживачів активною енергією без залучення потужності з енергосистеми. Винятком є короточасний незначний перетік потужності від АГ до енергосистеми з піковим значенням 50 кВт у період між 20 та 30 секундами.

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

КНУ.РБ.141.25.249с-11.02

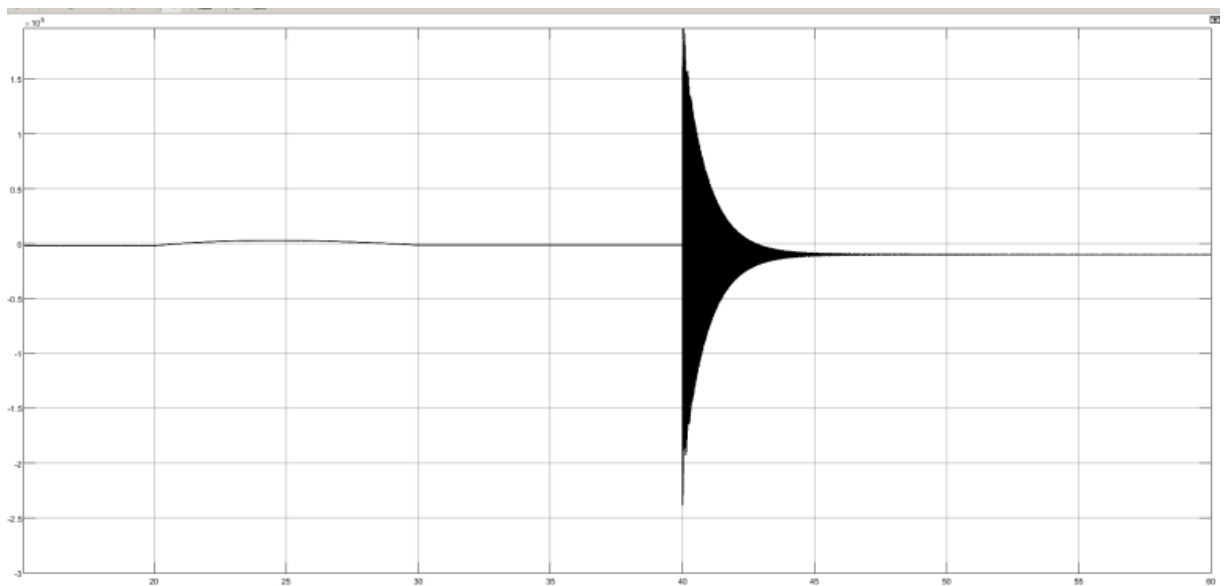
Арк.

46

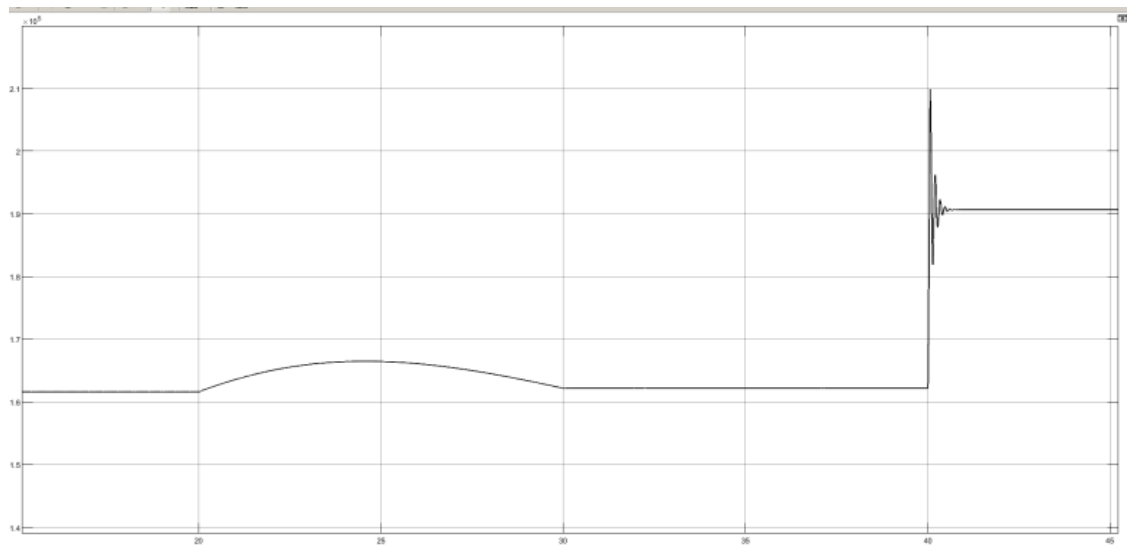
### 2.2.3 Функціонування вітроенергетичних установок із включенням у їх структуру конденсаторних батарей

Як показано в дослідженнях [25, 32], конденсаторні батареї, що входять до складу електромеханічного комплексу ВЕУ на базі АГ, є важливим фактором, що впливає на її роботу. Розглянемо їхній вплив у контексті паралельної роботи з енергосистемою. У разі вилучення конденсаторних батарей із схеми, динаміка процесів в АГ залишається практично такою ж, як і за наявності ємнісних збуджуючих елементів. Це пояснюється тим, що при підключенні до енергосистеми АГ працює як типова машина змінного струму, ротор якої обертається з надсинхронною швидкістю, підтримуючи генераторний режим.

Попри те, що АГ в такому режимі вже не потрібне збудження від конденсаторів (оскільки його може забезпечити енергосистема), вилучення конденсаторних батарей практично не впливає на графіки напруги, швидкості, а також активних потужностей АГ та енергосистеми. Однак розподіл реактивної потужності між АГ та енергосистемою змінюється, що відображено на рис. 2.18.



а)



б)

Рисунок 2.18 – Графік реактивної потужності енергосистеми та АГ при спільній роботі з енергосистемою: а) з конденсаторами, б) без них

Аналіз рисунка 2.18 свідчить, що при наявності конденсаторів, налаштованих на збудження автономного АГ, енергосистема практично не споживає реактивної потужності. У разі їх відсутності споживання реактивної потужності зростає до 160–190 кВАр. Це дає підстави зробити висновок, що АГ у складі ВЕУ повинен бути постійно зашунтований самозбуджувальними конденсаторами. Це забезпечить стабільні параметри якості ЕЕ в автономному режимі (наприклад, при аварійному відключенні енергосистеми), а також дозволить уникнути перетоків реактивної потужності в умовах паралельної роботи з енергосистемою, що, у свою чергу, дає змогу зменшити необхідний перетин проводів у системі електропостачання.

Крім того, результати моделювання показують, що розрахункові значення конденсаторів збудження повністю збігаються з розрахунковими параметрами конденсаторів компенсації реактивної потужності. Це закономірно, оскільки обидва розрахункові підходи базуються на однакових фізичних принципах, пов'язаних із процесами намагнічування обмотки статора АГ.

## ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто стан вітроенергетики України та актуальність її впровадження в практику роботи гірничорудних підприємств. Проаналізовані можливі режими роботи ВЕУ та особливості підключення їх до електричних мереж гірничорудних підприємств.

На основі проведених модельних досліджень режимів роботи ВЕУ у складі електроенергетичних мереж гірничорудних підприємств можна сформулювати такі висновки:

1. Автономний режим роботи ВЕУ є більш чутливим до коливань параметрів при дії збурюючих впливів порівняно з режимом сумісної роботи з централізованою енергосистемою. Водночас, за умови належного налаштування регуляторів параметрів (куту повороту лопатей та ємності збудження АГ), така установка здатна підтримувати частоту та напругу в межах, допустимих стандартами якості ЕЕ для промислових споживачів.

2. У разі паралельної роботи збалансованої ВЕУ з енергосистемою процеси проходять стабільніше та передбачуваніше. Проте, в момент різкого підключення активного навантаження в безпосередній близькості до ВЕУ, енергосистема зазнає короткочасного викиду активної потужності, що відповідає величині підключеного навантаження.

3. Ємність збудження АГ у ВЕУ виконує дві ключові функції: забезпечення самозбудження генератора в автономному режимі та компенсацію реактивної потужності при паралельній роботі з енергосистемою. Відтак, АГ повинен бути постійно зашунтований конденсаторами самозбудження для:

– підтримання допустимих параметрів якості ЕЕ в автономному режимі (у разі аварійного відключення енергосистеми);

– запобігання перетокам реактивної потужності в умовах сумісної роботи, що дозволяє уникнути перевантаження мережі та зменшити вимоги до провідників.

|           |      |              |        |      |                         |                     |      |
|-----------|------|--------------|--------|------|-------------------------|---------------------|------|
|           |      |              |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.В |                     |      |
| Змн.      | Арк. | № докум.     | Підпис | Дата |                         |                     |      |
| Розробив  |      | Радейко Д.І. |        |      | Висновки                | Літ.                | Арк. |
| Перевірів |      | Дозоренко    |        |      |                         |                     | 48   |
|           |      |              |        |      |                         |                     | 1    |
| Н. Контр. |      | Дозоренко    |        |      |                         | КНУ<br>гр. ЕЕМ-21-2 |      |
| Затвердж. |      | Федотов В.О. |        |      |                         |                     |      |

# 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>.

[2] Енергетична ефективність України. Кращі проектні ідеї [електроне видання]: Проект: «Професіоналізація та стабілізація енергетичного менеджменту в Україні»/ Уклад.: С.П. Денесюк, О.В. Коцар, Ю.В. Чернецька. – К.: КПІ 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] 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.

[6] 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>.

[7] International Energy Agency | World Energy Outlook 2024. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/140a0470-5b90-4922-a0e9-838b3ac6918c/WorldEnergyOutlook2024.pdf>.

[8] Лежнюк П.Д. Розосереджені джерела електроенергії в електричних мережах / П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик, О.А. Ковальчук, В.О. Хоменко // Вісник

|           |               |          |        |      |                               |                     |      |         |  |
|-----------|---------------|----------|--------|------|-------------------------------|---------------------|------|---------|--|
|           |               |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.Л       |                     |      |         |  |
|           |               |          |        |      |                               |                     |      |         |  |
| Змн.      | Арк.          | № докум. | Підпис | Дата |                               |                     |      |         |  |
| Розробив  | Радейко Д.І.  |          |        |      | Список використаних<br>джерел | Літ.                | Арк. | Акрушів |  |
| Перевірив | Дозоренко     |          |        |      |                               |                     | 49   | 4       |  |
|           |               |          |        |      |                               | КНУ<br>гр. ЕЕМ-21-2 |      |         |  |
| Н. Контр. | Дозоренко О.В |          |        |      |                               |                     |      |         |  |
| Затвердж. | Федотов В.О.  |          |        |      |                               |                     |      |         |  |

Чернігівського державного технологічного університету. – 2011. – № 1. – С. 104–108.

[9] 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.

[10] Сінчук О. М. До питання формування енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації електричної енергії гірничорудних підприємств / О. М. Сінчук, С. М. Бойко, В. О. Федотов, О. В. Дозоренко // Розвиток промисловості та суспільства : матеріали міжнародної науково-технічної конференції : [тези доповідей]. – Кривий Ріг, 2021. – С. 48.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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>.

[14] 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>.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249С-11.Л | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 51   |

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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. 256-26.

[18] 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.

[19] Півняк Г. Г., Білий М. М., Бажін Г. М. Електропостачання гірничих підприємств: Довідковий посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2008. – 550 с.

[20] І. О. Сінчук, Коментар до стану електроенергетики залізрудних підприємств як сегмента їх конкурентоспроможності. Кременчук, Україна: ПП Щербатих О. В., 2018. – 166 с.

[21] 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.

[22] 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.

[23] Енергоефективність та відновлювані джерела енергії. Під заг. ред. Шидловського А.К. – Київ: Українські енциклопедичні знання, 2007. – 559 с.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249с-11.Л | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 52   |

[24] 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.

[25] 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>.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 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.

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

[31] 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.

[32] Дозоренко О. В., Сьомочкин А. Б. Особливості роботи вітроенергетичної установки з асинхронним генератором з ємнісним збудженням / Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні

питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва»: збірник тез доповідей. // Кривий Ріг: КНУ, 2020. – С. 8.

[33] 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.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ.РБ.141.25.249С-11.Л | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 54   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |