

Вінницький національний технічний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Підвищення ефективності комбінованих автономних систем електропостачання на базі електроустановок з відновлюваними джерелами енергії»

Виконав: студент 2-го курсу, гр. ЕПА-22м  
спеціальності 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Роман Щербина  
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф. кафедри КЕМСК  
Олександр ПАЯНОК  
(прізвище та ініціали)

«21» 11 2023 р.

Опонент: Бабенко О.В.  
(прізвище та ініціали)

«11» 12 2023 р.

Допущено до захисту  
Зав. кафедри Бабенко О.В.  
«21» 11 2023 р.



Київський національний технічний університет  
Факультет Електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів  
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
Кількість знань 14 – Електрична інженерія  
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Навчально-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації та електродвигунів»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувача кафедри**

К.Т.Н., доц.

Микола МОШНОРИЗ

24 10 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**

**НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Щербина Роман Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення ефективності комбінованих автономних систем електропостачання на базі електроустановок з відновлюваними джерелами енергії.

2. Керівник роботи Паянок Олександр Анатолійович, к.т.н., доц. каф. КЕМСК

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Затверджені наказом вищого навчального закладу від "18" 09 2023 року №247

4. Строк подання студентом роботи 28.11.23р

5. Вихідні дані до роботи: режим роботи повторно-короткочасний, АД з КЗ ротором типу А13-37-6, діаграма підйому, забезпечення режимів роботи установки: моделювання, розгін з частотною корекцією, робота на заданій швидкості в режимі гальмування в рекуперативному режимі.

6. Зміст текстової частини: Вступ; 1 Сучасний стан автономних систем електропостачання з використанням відновлювальних джерел електроенергії. 2 Розробка структури комбінованої автономної системи електропостачання на базі відновлювальних джерел електроенергії. 3 Техніко-економічне обґрунтування впровадження комбінованої автономної системи електропостачання. 4 Вибір та розрахунок елементів автономної системи електропостачання. 5 Розробка схем електричних принципів підсистем автономної системи електропостачання. 6 Розробка алгоритмів керування режимами роботи фотодизельної системи електропостачання. 7 Імітаційне моделювання елементів автономної системи електропостачання в ППП MATLAB SIMULINK. 8 Оптимізація режимів роботи досліджуваної комбінованої автономної системи. 9 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки.

7. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження; Мета, задачі та об'єкт дослідження. Загальна характеристика систем ЕП на основі ВДЕ. Концепції побудови автономних СЕП на основі ВДЕ. Обґрунтування та розробка структури КАСЕП. Вибір елементів КАСЕП (СФЕС). Обґрунтування та вибір стрінгових інверторів. Обґрунтування та вибір ДГУ та контролера



керування. Схема електрична принципова системи КАСЕП. Схема електрична принципова підсистеми СФЕС. Схема електрична принципова підсистеми ДГУ. Алгоритми керування режимами роботи КАСЕП. Імітаційне моделювання підсистем КАСЕП. Оптимізація режимів роботи досліджуваної комбінованої автономної системи. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

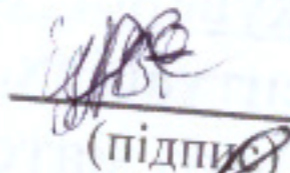
| Розділ  | Прізвище, ініціали та посада консультанта              | Підпис, дата   |                  |
|---|--|----------------|------------------|
|   |  | завдання видав | завдання прийняв |
| Спеціальна частина                                | к. т. н., доц. каф. КЕМСК<br>Паянок О.А.               | 24.10.2023     | 21.11.2023       |
| Економічна частина                                | Шулле Ю.А.<br>к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ                  | 24.10.2023     | 21.11.2023       |
| Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях | Зав. каф. БЖДПБ, д.пед.н., проф.<br>Кобилянський О. В. | 24.10.2023     | 21.11.2023       |

7. Дата видачі завдання 24.10.2023

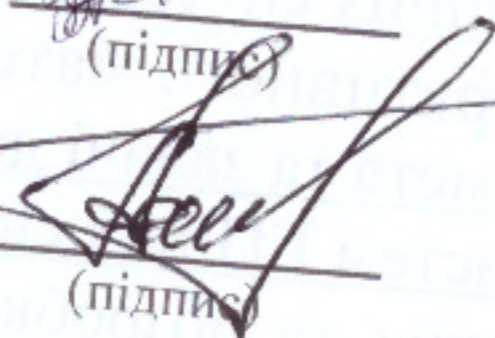
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи  | Строк виконання етапів роботи | Примітки |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1     | Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР) | 03.10.2023р.                  |          |
| 2     | Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР  | 21.11.2023р.                  |          |
| 3     | Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР  | 28.11.2023р.                  |          |
| 4     | Виконання розділу «Економічна частина»                                     | 21.11.2023р.                  |          |
| 5     | Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»      | 28.11.2023р.                  |          |
| 6     | Попередній захист МКР  | 28.11.2023р.                  |          |
| 7     | Нормоконтроль МКР  | 28.11.2023р.                  |          |
| 8     | Рецензування МКР   | 11.12.2023р.                  |          |
| 9     | Захист МКР   | 12.12.2023                    |          |

Студент

  
(підпис)

Керівник роботи

  
(підпис)

Шулле Ю.А.  
(прізвище та ініціали)

Паянок  
(прізвище та ініціали)



## АНОТАЦІЯ

УДК: 621.313.322

Щербина Р.В. Підвищення ефективності комбінованих автономних систем електропостачання на базі електроустановок з відновлюваними джерелами енергії. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма - електрична інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2023. 130 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 22 назв; рис.: 37; табл. 17.

В магістерській кваліфікаційній роботі були запропоновані рішення щодо підвищення ефективності комбінованих автономних систем електропостачання на базі електроустановок з відновлюваними джерелами енергії. В основній частині роботи розглянуті особливості застосування відновлюваних джерел електричної енергії, сучасні тенденції їх розвитку та концепції, а також вимоги, які пред'являються до комбінованих систем автономного електропостачання. Обґрунтовано розробку структури КАСЕП. Здійснено вибір та розрахунок елементів комбінованої автономної системи електропостачання. Розроблено схеми електричні структурні та принципові комбінованого автономного електротехнічного комплексу та блок-схему алгоритму оптимізації режимів його роботи. Запропоновано функціональний алгоритм взаємодії системи накопичення електричної енергії з дизель-генераторною установкою для автономних енергетичних комплексів, а також ефективні алгоритми керування їхніми робочими режимами із врахуванням оптимального завантаження ДГУ. Методом комп'ютерного моделювання в ППП Matlab Simulink досліджено динамічні характеристики системи КАСЕП. Запропоновано модель системи накопичення електричної енергії з можливістю введення технічних параметрів через діалогове вікно, модель автономного споживача електроенергії та методика аналізу режимів електроспоживання автономними енергетичними системами.

Графічна частина складається з 17 плакатів із результатами роботи.

В розділі охорони праці визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

Ключові слова: електротехнічний комплекс, сонячна станція, дизель-генераторна установка, інвертор, система моніторингу, моделювання, схема принципова.



## ABSTRACT

Scherbyna R.V. Increasing the efficiency of combined autonomous power supply systems based on electrical installations with renewable energy sources. Master's thesis in specialty 141 - electricity, electrical engineering and electromechanics, educational program - electrical engineering Vinnitsa: VNTU, 2022. – 130 p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 22 titles; fig.: 37; tabl. 17.

In the master's thesis, solutions were proposed to increase the efficiency of combined autonomous power supply systems based on electrical installations with renewable energy sources. In the main part of the work, the peculiarities of the use of renewable sources of electric energy, modern trends in their development and concepts, as well as the requirements for combined autonomous power supply systems are considered. The development of the KASEP structure is substantiated. The selection and calculation of the elements of the combined autonomous power supply system was carried out. The electrical structural and principle diagrams of the combined autonomous electrotechnical complex and the block diagram of the optimization algorithm of its operation modes have been developed. A functional algorithm for the interaction of the electric energy storage system with a diesel generator set for autonomous energy complexes is proposed, as well as effective algorithms for controlling their operating modes, taking into account the optimal loading of the diesel generator. The dynamic characteristics of the KASEP system were investigated using computer modeling in Matlab Simulink. A model of the electric energy storage system with the possibility of entering technical parameters through a dialog box, a model of an autonomous electricity consumer and a method of analyzing electricity consumption modes by autonomous energy systems are proposed.

The graphic part consists of 17 posters with the results of the work.

In the section on labor protection, the main provisions regarding the safe operation of the studied electrotechnical complex under the influence of harmful factors of the surrounding environment are defined.

Key words: electrical engineering complex, solar station, diesel generator set, inverter, monitoring system, modeling, schematic diagram.



## ЗМІСТ

|  |           |
|--|-----------|
| ВСТУП.....   | 5         |
| <b>1 СУЧАСНИЙ СТАН АВТОНОМНИХ СИСТЕМ<br/>ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ<br/>ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ<br/>ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....</b>        |           |
|  | <b>9</b>  |
| 1.1 Аналіз можливості застосування установок відновлюваної енергетики<br>в автономних системах електропостачання.....                    | 9         |
| 1.2 Вимоги до комбінованих систем автономного електропостачання.....   | 15        |
| 1.3 Існуючі схеми автономних систем електропостачання з бази<br>відновлювальних джерел електроенергії.....                               | 16        |
| 1.4 Концепція електричного узгодження фотоелектричних та дизельних<br>електричних станцій на постійному струмі.....                      | 17        |
| 1.5 Висновок.....  | 19        |
| <b>2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ КОМБІНОВАНОЇ АВТОНОМНОЇ<br/>СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ<br/>ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....</b> |           |
|  | <b>20</b> |
| 2.1 Аналіз режимів роботи автономної системи електропостачання та<br>вибір структури системи КАСЕП.....                                  | 20        |
| 2.2 Визначення потенційних витрат електроенергії автономним<br>споживачем .....  | 26        |
| 2.3 Висновок.....  | 28        |
| <b>3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ<br/>КОМБІНОВАНОЇ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ<br/>ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....</b>                    |           |
|  | <b>29</b> |
| 3.1 Технічне обґрунтування вибору складових системи КАСЕП .....  | 29        |
| 3.2 Економічне обґрунтування вибору складових системи КАСЕП .....  | 31        |
| 3.3 Висновок.....  | 38        |



|  |            |
|--|------------|
| <b>4 ВИБІР ТА РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....</b>                     | <b>41</b>  |
| 4.1 Розрахунок параметрів сонячної фотоелектричної станції.....                                      | 41         |
| 4.2 Деталізація характеристик та вибір ДГУ системи КСАЕП.....  | 48         |
| 4.3 Вибір контролера керування дизель-генераторної установки.....                                    | 50         |
| 4.4 Вибір проміжного накопичувача енергії.....   | 52         |
| 4.5 Вибір стрінгових інверторів ФЕС 10 кВ.....   | 56         |
| 4.6 Висновок.....  | 57         |
| <b>5 РОЗРОБКА СХЕМ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИНЦИПОВИХ ПІДСИСТЕМ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....</b>   | <b>58</b>  |
| <b>6 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ФОТОДИЗЕЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....</b> | <b>64</b>  |
| 6.1 Висновок.....  | 68         |
| <b>7 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В ППП MATLAB SIMULINK</b> | <b>69</b>  |
| 7.1 Моделювання режимів роботи дизель-генераторної установки.....                                    | 70         |
| 7.2 Моделювання фотоелектричної системи в MATLAB Simulink.....                                       | 71         |
| 7.3 Моделювання системи накопичення електричної енергії.....   | 74         |
| 7.4 Моделювання споживача електричної енергії.....   | 76         |
| 7.5 Висновок.....  | 78         |
| <b>8 ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ КОМБІНОВАНОЇ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ.....</b>               | <b>79</b>  |
| <b>9 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....</b>                                      | <b>85</b>  |
| <b>ВИСНОВКИ.....</b>   | <b>103</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>   | <b>105</b> |
| Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання.....  | 109        |
| Додаток Б (обов'язковий) Ілюстративна частина.....   | 113        |



## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** У світі широко практикується інтеграція різних видів відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) із системою накопичення електроенергії (СНЕЕ) до складу автономного електротехнічного комплексу електропостачання з використанням дизель-генераторних установок (ДГУ). В даний час частіше інтегруються фотоелектричні станції (ФЕС) завдяки хорошим експлуатаційним характеристикам і вартості, що стабільно знижується. Автономні фото-дизельні електроенергетичні системи (ФДЕС) змінного струму мають набір відомих технічних, економічних та екологічних переваг, що обґрунтовують їх використання для електропостачання об'єктів, що не мають доступу до централізованої електроенергетичної системи. Подібними малопотужними об'єктами (одиниці-десятки кВт) є нафтогазові та гірничодобувні підприємства, нечисленні населені пункти, вахтові житлові селища, метеорологічні станції, базові вежі стільникового зв'язку, фермерські господарства тощо. Як головний позитивний ефект від використання ФДЕС є економія дизельного палива за рахунок заміщення частини електричної енергії ДГУ фотоелектричною генерацією.

Зазвичай електричним вузлом сполучення СФЕС для взаємодії на змінному струмі з ДГУ є мережевий (гібридний) інвертор. Однак, перевищення фотоелектричного вироблення понад допустимий рівень у певні часові інтервали веде до необхідності обмеження вихідної потужності СФЕС. Причиною лімітування потужності ФЕС щодо ДГУ є дотримання умови сталої роботи мережевого інвертора.

Зазвичай рекомендована величина встановленої потужності СФЕС, що працює паралельно з ДГУ, має перевищувати 30–40% від сумарної генерації. Для підвищення енергоефективності ФДЕС, вся доступна енергія СФЕС повинна споживатися навантаженням, при балансі генерованої та споживаної електроенергії в автономній системі електропостачання.



Таким чином, для розвитку загальної теорії електротехнічних комплексів автономного електропостачання, вивчення їх системних властивостей і зв'язків компонентів, з метою поліпшення техніко-економічних характеристик ФДЕС актуально переглянути використання класичної топології змінного струму в таких системах електропостачання на користь топології ФДЕС на постійному струмі.

Запропоновані рішення мають обґрунтовуватися розробкою концепції структурної взаємодії між компонентами ФДЕС, розробкою енергоефективних алгоритмів управління системою, що ґрунтуються на інтелектуальних підходах прийняття рішень з метою збільшення вкладу СФЕС у загальному енергетичному балансі в порівнянні з системою на змінному струмі. Обґрунтування має доповнюватися розробкою методики оптимізації електротехнічного комплексу автономного електропостачання, спрямованої на мінімізацію експлуатаційних витрат ФДЕС на постійному струмі.

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

Робота виконувалася відповідно до наукового напрямку кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів ВНТУ.

#### **Мета і завдання дослідження.**

Мета роботи полягає в підвищенні енергоефективності автономних комбінованих систем електропостачання з використанням відновлювальних джерел електроенергії, зокрема в даному випадку фото-дизельних електротехнічних комплексів електропостачання, шляхом оптимізації їх складу та режимів роботи з використанням інтеграції ДГУ та СФЕС.

До **задач** магістерської кваліфікаційної роботи можна віднести:

- аналіз існуючих комбінованих систем автономного електропостачання на основі відновлювальних джерел енергії;
- техніко-економічний розрахунок впровадження комбінованої системи автономного електропостачання на основі відновлювальних джерел енергії;



- розрахунок та вибір елементів комбінованої системи автономного електропостачання на базі відновлювальних джерел енергії;
- розробка схеми електричної структурної електротехнічного комплексу комбінованої автономної системи електропостачання;
- розробка схем електричних принципів модулів електротехнічного комплексу комбінованої автономної системи електропостачання;
- розробка алгоритму оптимізацій структури та режимів роботи енергетичного обладнання системи КАСЕП;
- імітаційне моделювання режимів роботи комбінованої системи автономного електропостачання на основі фото-дизельних електротехнічних комплексів.

**Об'єкт дослідження** є процеси перетворення енергії в комбінованих автономних системах електропостачання з відновлювальними джерелами енергії на основі фото-дизельних електротехнічних комплексів.

**Предметом дослідження** є математичні моделі та структури, які дозволяють підвищити ефективність комбінованих автономних систем електропостачання з відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ) на основі фото-дизельних електротехнічних комплексів.

**Методи дослідження** засновані на використанні методів теорії електричних машин, теорії управління, методів синтезу нелінійних систем управління, теорії та методів математичного моделювання, методів системних досліджень в енергетиці.

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

Розроблено схеми електричні структурні та принципів комбінованої автономної системи електропостачання з відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ) на основі фото-дизельних електротехнічних комплексів, алгоритм їх роботи, які, на відміну від існуючих, дозволяють оптимізувати режими роботи енергетичної системи з метою підвищення її ефективності.

**Практичне значення одержаних у роботі результатів полягає в наступному:**



- здійснено вибір та розрахунок елементів комбінованої автономної системи електропостачання, а саме: елементи фотогальванічної електростанції, проміжного накопичувача енергії, контролера ДГУ та інверторів СФЕС;

- розроблено алгоритм функціонування системи КАСЕП;

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати магістерської кваліфікаційної роботи отримано автором самостійно.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорювались на науково-технічній конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2023).

**Публікації.** За тематикою дослідження опубліковано 1 тези доповідей матеріалів конференцій:

- Алгоритм узгодженої роботи установок відновлювальних джерел енергії/ О.А. Паянок, Р.В. Щербина – Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)», Вінниця, 2024 – 3 с.



# 1 СУЧАСНИЙ СТАН АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

## 1.1 Аналіз можливості застосування установок відновлюваної енергетики в автономних системах електропостачання

Впровадження в децентралізованих регіонах нових технологій, заснованих на використанні природних відновлювальних ресурсів, може в значній мірі вирішити проблему енергозабезпечення децентралізованих зон, знизити витрати бюджету на завезення палива для дизельних електростанцій (ДЕС), підвищити надійність забезпечення населення електрикою і теплом.

Останнім часом у всьому світі дедалі більше акцентується увага на концепції розвитку електроенергетичних мереж, що отримала назву Smart Grids. Термін Smart Grid можна трактувати як розумний або прагматичний підхід до розвитку електроенергетичних систем (ЕЕС) з метою підвищення їх ефективності, надійності, а також сталого розвитку для потреб майбутніх поколінь [1].— концепція інноваційного перетворення електроенергетики, що передбачає перегляд існуючих базових принципів модернізації галузі, що зумовлюють підвищену увагу до цього напрямку [1]. Витоки цієї концепції ведуть свій початок від природних проблем зростання споживання електроенергії людством та зміни клімату, що супроводжуються негативним впливом на довкілля. Саме антропогенний фактор кліматичних змін диктує нові та досить суперечливі шляхи розвитку для галузі виробництва електроенергії.

Тренд на інтелектуальний розвиток ЕЕС є актуальним, оскільки створення нечутливої до зовнішньоекономічних факторів галузі — пріоритетне завдання для країн-лідерів енергетичного сектору. Прикладом такого зовнішньо-економічного впливу є скорочення споживання електроенергії на 3,8% у 2020 році через світову пандемію.



ВДЕ – один із головних інструментів, які забезпечують досягнення цілей Паризької угоди щодо клімату. Наприклад, до кінця 2019 року Німеччина має 49 ГВт встановленої потужності фотоелектричних установок, що дозволило виробити 8,2% загального споживання електроенергії при виробленні близько 46,5 ТВт·год.

Проте, не можна із впевненістю назвати ВДЕ «панацеєю». Нажаль, ВДЕ мають одну істотну ваду: переривчастий характер роботи, викликаний стохастичною природою первинного енергоносія. У зв'язку з цим велика кількість установок з виробництва електроенергії на основі ВДЕ, пов'язаних або інтегрованих в існуючі ЕЕС, потенційно можуть дестабілізувати їх роботу, стати причиною серйозних збурюючих впливів, а також порушити, усталений режим ЕЕС.

Прикладом концепції Smart Grid є модель Microgrid. Це свого роду «наступник» концепції Smart Grids, удосконалений підхід до системи електропостачання, який сфокусований на широкомасштабному впровадженні розподіленої генерації з ВДЕ в ЕЕС, що забезпечує зниження втрат та підвищення надійності розподілу електроенергії. Мікромережі – локально обмежені та незалежно керовані електричні мережі, у яких розгалужена архітектура здатна забезпечити нерівномірні навантаження електричною енергією від розподілених енергетичних джерел [10]. Мікромережі пропонують достатню кількість переваг, здатних звернути на них увагу інвесторів порівняно з іншими варіантами електрифікації. На відміну від централізованої енергосистеми, вони дешевші в установці, мають більш короткий час виконання монтажу (для фотоелектричних станцій (ФЕС), розміри, що відповідають місцевим вимогам, можуть змінюватися в залежності від зростаючих потреб або технологій. Графічна інтерпретація концепції мікромережі приведена на рисунку 1.1.





Рисунок 1.1 – Блок-схема реалізації концепції мікромережі

Такі мікромережі можна поділити на дві основні групи: мікромережі потужністю менше 10 кВт та від 10 кВт до 10 МВт. Кожна мікромережа, незалежно від величини встановленої потужності, складається із системи вироблення електроенергії та її розподілу у вузлах електромережі. Система вироблення електроенергії, у свою чергу, складається з підсистем генерації та зберігання. Розподіл невеликої потужності (до 100 кВт включно) складається з підсистем розподілу та споживання. Підсистема генерації включає генератори енергії, стабілізатори і перетворювачі напруги і технології управління живленням.

Підсистеми розподілу включають мережі передачі електроенергії окремим споживачам по кабельним лініям (КЛ) чи повітряним лініям (ПЛ). Підсистеми споживання включають все обладнання на стороні кінцевого споживача після межі балансової приналежності, тобто вимірювальні прилади, електропроводку, заземлення і електричні навантаження. Мікромережа може керувати собою за допомогою мікропроцесорного центру керування та високошвидкісних електронних пристроїв, які використовуються для швидкого перемикавання навантажень та енергоблоків.



Крім того, мікромережа може функціонувати як автономна система електропостачання (АСЕП), так і спільно (паралельно) з основною генеруючою мережею. Працюючи в паралельному режимі, мікромережа може накопичувати надлишок енергії від своїх власних генеруючих блоків та основної мережі, щоб згодом покривати піки споживання або служити резервом для мережі у разі несправностей та вимкнень. Працюючи в режимі АСЕП, мікромережа має повністю незалежний алгоритм роботи від централізованої мережі, заснований на виробництві та накопиченні електроенергії. З погляду паралельного режиму роботи, мікромережа може розглядатися як єдина адаптивна ЕЕС, коли це необхідно, виробляти тепло разом із електрикою.

Основною технічною проблемою, яка стримує практичне застосування ВЕУ і ФЕС в комбінованих системах автономного електропостачання (КСАЕП) децентралізованих споживачів, є велика мінливість та значна непостійність енергії первинного енергоносія. Для надійного забезпечення споживача електричною енергією потрібно гарантоване джерело живлення, в якості якого можуть використовуватися ДЕС і / або буферний накопичувач енергії (рисунок 1.2).

Таким чином, практичне впровадження технологій відновлюваної енергетики в райони децентралізованого електропостачання України доцільно проводити, використовуючи в якості базового гарантованого джерела електроживлення існуючі та ті, що знаходяться в експлуатації ДЕС. Це дозволить при мінімальних фінансових витратах отримати відчутний економічний і соціальний ефект. Існуючі дослідження показують, що можна значно підвищити ефективність комбінованої автономної енергетичної системи, побудованої на базі ДЕС, ВЕУ і ФЕС, введенням до її складу буферного накопичувача енергії (БНЕ) або іншими словами – використання акумуляторних батарей.



Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд ДЕС

Це пояснюється тим, що енергетичні характеристики автономної системи електропостачання, що використовує ВДЕ, багато в чому залежать від ступеня корисного використання енергії первинного поновлюваного енергоносія, а вихідні енергетичні характеристики ВЕУ і ФЕС безпосередньо залежать від величини їх навантаження.

Отже, для максимально корисного використання первинної енергії вітру і сонячного випромінювання в замкнутій енергетичній системі необхідним є спеціалізований пристрій керування, який має забезпечувати регулювання величини навантаження ВЕУ і ФЕС за певними законами, при цьому забезпечуючи запас енергії, що генерується в періоди її надлишків, і віддачу в періоди нестачі.

Щодо фотоелектричних станцій. Сьогодні все більш широке застосування в різних країнах знаходять фотоелектричні перетворювачі (ФЕП). Більше 90% ринку – це ФЕП на основі полі-і моно-кристалічного кремнію, модулі яких мають ККД 15-17%. В умовах середніх широт такі фотоелектричні установки можуть виробляти 120-200 кВт год / м<sup>2</sup> рік.



Фотоелектричні СЕС (див. рисунок 1.3) мають велику привабливість для інвесторів, оскільки вони модульного типу і тому не вимагають великих початкових капітальних вкладень. При пуску модуля СЕС в експлуатацію він негайно починає повертати інвестиції, тому витрати і повернення інвестицій можна планувати протягом всього періоду будівництва СЕС.



Рисунок 1.3 – Сонячна фотоелектрична станція

Перевагою фотоелектричних СФЕС є низькі експлуатаційні витрати 0,07 цента/кВт.год, вони не вимагають води для роботи і можуть встановлюватися в гірській місцевості, на дахах і фасадах будівель, в пустелях і в країнах з вологим тропічним кліматом. Концентратори збільшують ефективність СЕ і призводять до зниження вартості дорогого напівпровідникового матеріалу на одиницю потужності, однак при цьому виникають додаткові витрати на виробництво концентраторів систем охолодження СЕ і систем стеження.

Напрямки подальшого розвитку передбачають зниження витрат матеріалів на опорні конструкції, дзеркальні відбивачі, системи охолодження і напівпровідникові СЕ і підвищення оптичного і електричного ККД СЕС.

У багатьох дослідницьких центрах ведуться роботи, спрямовані на підвищення ККД ФЕП за рахунок створення шарових (каскадних) структур, що забезпечують більш повне перетворення енергії сонячного випромінювання в усьому його спектрі, а також на зниження вартості напівпровідникових матеріалів і ФЕП в цілому за рахунок застосування тонкоплівкових структур і використання концентраторів сонячного випромінювання. Сучасні технології напівпровідникової електроніки і нанотехнології дозволять збільшити ККД МСЕ в найближчі роки до 30-35% і знизити вартість фотоелектричних СЕС з концентраторами і кремнієвими СЕ.

## **1.2 Вимоги до комбінованих систем автономного електропостачання**

Проведений вище порівняльний аналіз характеристик установок відновлювальної енергетики показав, що основними технічними проблемами автономних систем електропостачання, що використовують енергоустановки відновлюваної енергетики, є:

1. Мінливість в часі енергії первинного енергоносія і стохастичний характер навантаження споживача. Тобто потрібне гарантоване джерело живлення, яке забезпечує споживача електроенергією в періоди відсутності або недостатності первинного поновлюваного енергоресурсу.

2. Співвимірність потужностей генеруючих джерел і електричного навантаження знижує загальний рівень надійності електропостачання споживачів і негативно позначається на якості генерованої електроенергії. В такому разі необхідне гарантоване джерело живлення, яке забезпечує споживача якісною електроенергією в статичних і динамічних режимах зміни навантаження.

3. Яскраво виражена залежність виробленої потужності генеруючими установками відновлюваної енергетики від параметрів поновлюваного енергоресурсу (для вітроенергетичних установок кубічна залежність вихідної



потужності від швидкості вітру) вимагає наявності в енергетичній системі спеціальних пристроїв, що обмежують вихідну потужність, або розсіюють вироблену електроенергію. В такому разі для КАСЕП необхідним є пристрій запасання або акумулювання енергії в періоди пікової потужності первинного енергоносія[7-8].

### **1.3 Існуючі схеми автономних систем електропостачання з бази відновлювальних джерел електроенергії**

Поширення LVDC відкриває нові перспективи для розвитку та вдосконалення АСЕП. Наприклад, ділянка мережі електропостачання з підключенням до централізованої енергосистеми, доповнена топологією постійного струму з генерацією від ВДЕ, вже розглядається як раціональне рішення на децентралізованій території Фінляндії. Лаппеенрантський технологічний університет (ЛТУ), Elenia Oy та Ensto Finland Oy надали розробки технології промислового застосування LVDC у громадських розподільчих мережах 20 кВ. Їхня партнерська співпраця у сфері LVDC з метою запуску великомасштабного виробництва та розподілу живлення на постійному струмі дозволила розробити освітні програми навчання фахівців у галузі постійного струму, а також базу для стандартизації. На основі отриманих рішень здійснюється пілотний монтаж проекту низьковольтної системи електропостачання постійного струму у розподільній мережній компанії DSO Järvi-Suomen Energia Oy.

Дослідницький проект отримав назву «LVDC RULES», концепція якого представлена на рисунку 1.4. Розподільна мережа LVDC поєднує в собі розподіл постійного струму, силову електроніку та систему інформаційних та комунікаційних каналів, які є ключовими складовими для мікромережових рішень. Один із основоположних акцентів проекту спрямований на забезпечення безвідмовної роботи та сумісності всередині системи та екологічну взаємодію з довкіллям.

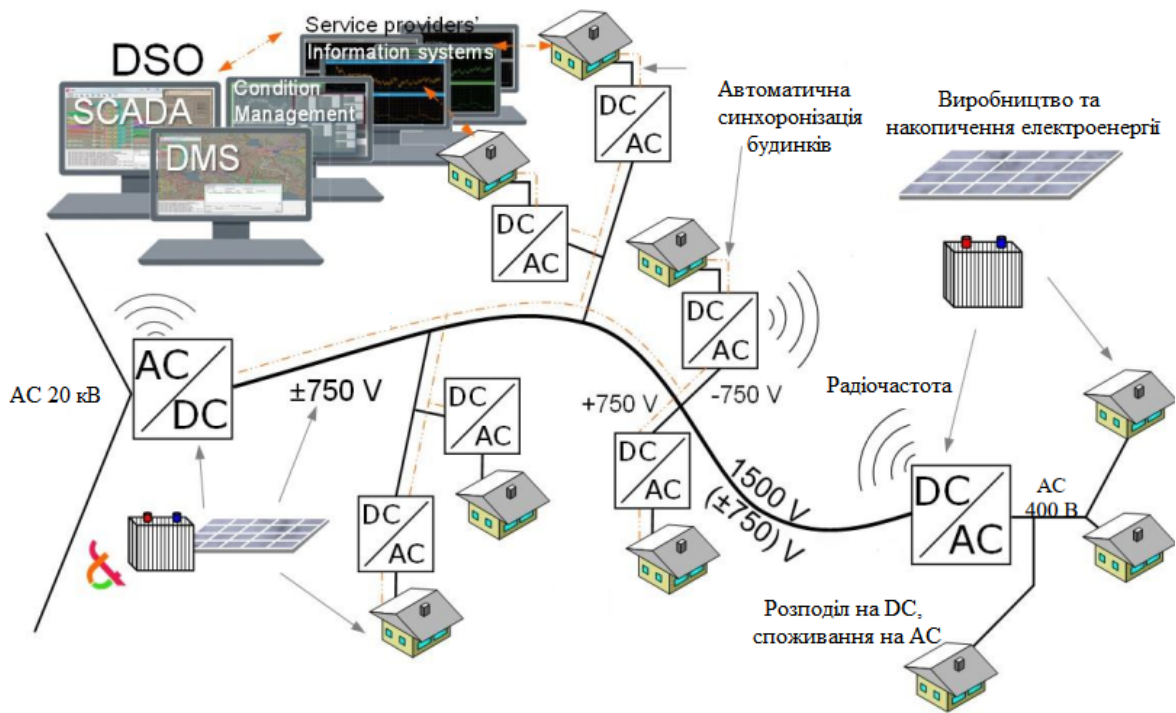


Рисунок 1.4 – Реалізація концепції LVDC RULES

Інфраструктура дослідницького пілотного проекту включає два повномасштабні майданчики мікромережі LVDC: один розташований на території кампуса ЛТУ (LUT Green Campus), а інший – у реально існуючій електричній мережі під управлінням розподільчої фінської компанії DSO Järvi-Suomen Energia Oy, що належить енергетичній корпорації Savon Sähkö Oy. Мережа LVDC знаходиться в режимі постійної експлуатації та постачає електроенергію для щоденних потреб чотирьох побутових споживачів. У той же час мережа постійного струму забезпечує виняткове середовище для вивчення роботи системи та мікромережі на основі LVDC, яка є частиною суспільної розподільної мережі через двосторонній AC/DC перетворювач.

#### 1.4 Концепція електричного узгодження фотоелектричних та дизельних електричних станцій на постійному струмі

Узагальнена блок-схема досліджуваної моделі системи автономного електропостачання з фотоелектричною установкою, системою накопичення



електроенергії та дизель-генераторною установкою приведена на рисунку 1.5.

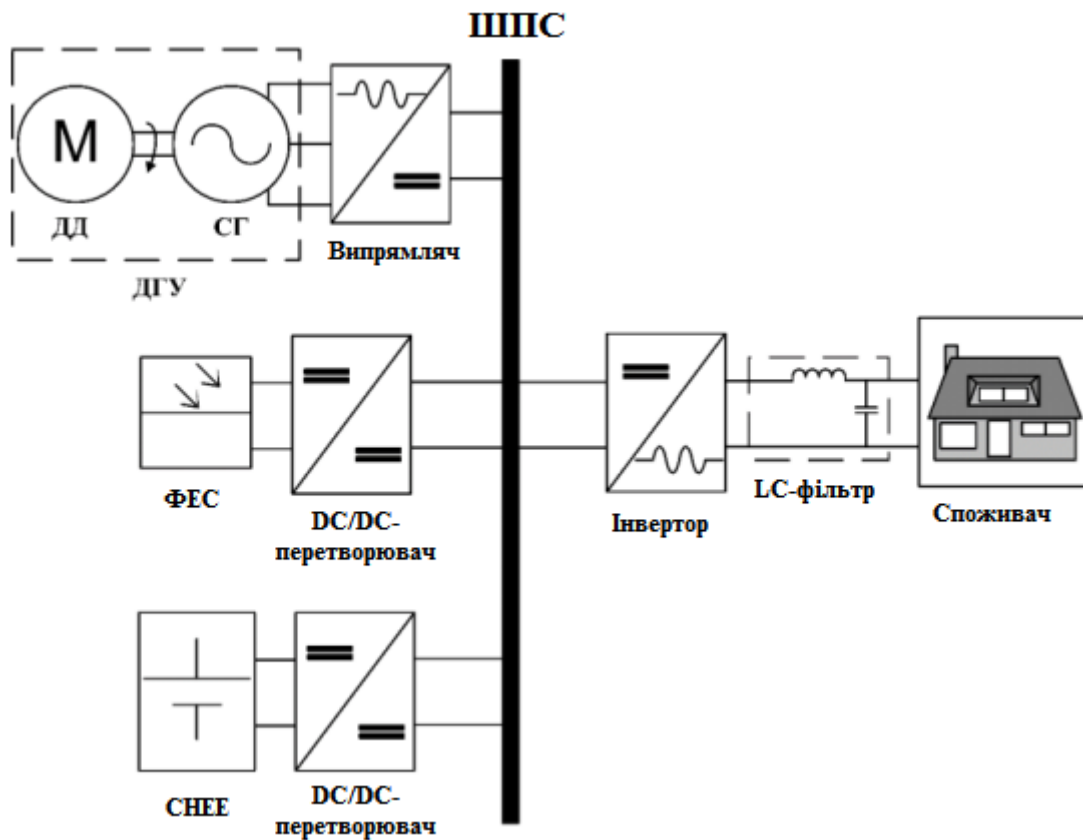


Рисунок 1.5 – Блок-схема фотодизельної системи електропостачання

Конфігурації та параметри ФДЕС на постійному струмі для електропостачання децентралізованих споживачів залежать від ряду факторів: добові та сезонні зміни інсоляції, хмарності, суттєво нерівномірного графіка електроспоживання об'єкта електрифікації, процесів енергоперетворення та розподілу потоків потужності. Крім неконтрольованих властивостей, потрібно передбачати оптимізацію комплектного складу, а також формування режимів роботи при варіації вихідних даних, наприклад, географії розташування, кліматичних показників сезонів протягом року.

Усі генеруючі та накопичувальні установки працюють на загальну шину постійного струму (ШПС) через власний DC/DC перетворювач, що забезпечує їхню узгоджену роботу спільного споживача. Електричне навантаження, що імітує автономного споживача електричної енергії,

підключається через свою силову перетворювальну ланку (гібридний інвертор та фільтр).

Враховуючи різні за своєю фізичною природою та методологією моделювання елементи автономної системи електропостачання, потрібне створення таких самих різних імітаційних моделей, спрямованих на вирішення поставлених технічних питань. Для дослідження балансу потужностей у децентралізованій енергетичній системі необхідно розробити моделі компонентів, що ґрунтуються на математичних співвідношеннях, що пов'язують їх вхідні параметри з вихідними енергетичними характеристиками. Такі моделі дозволятимуть проводити дослідження робочих режимів гібридного комплексу, що розглядається, на тривалих часових проміжках. Для вирішення завдань раціонального вибору основного енергетичного обладнання, проведення техніко-економічного аналізу, розробки інтелектуальних алгоритмів управління режимами використовуються методи цілісного лінійного програмування, сучасні програмні інструменти розробки карт логіки роботи системи.

**1.5 Висновок:** В результаті наповнення розділу були розглянуті особливості застосування відновлюваних джерел електричної енергії, сучасні тенденції їх розвитку та концепції, а також вимоги, які пред'являються до комбінованих систем автономного електропостачання



## **2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ КОМБІНОВАНОЇ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

### **2.1 Аналіз режимів роботи автономної системи електропостачання та вибір структури системи КАСЕП**

Системи з використанням технологій відновлюваної енергетики позбавлені недоліків дизельних електростанцій, проте мають свої особливості. Головна особливість полягає в тому, що сонячні фотоелектричні станції (СФЕС) та вітроелектричні установки (ВЕУ) використовують природні непостійні в часі джерела енергії, що, в свою чергу, позначається на надійності енергопостачання споживача [10].

Це питання вирішується, якщо основні технічні параметри споживання електроенергії визначаються відповідно до найгірших протягом розрахункового періоду року характеристик приходу сонячної радіації (СР). Однак, з огляду на нестабільність цих джерел енергії, надійність вироблення енергії одиночними СФЕС всеодно залишиться досить низькою, а підвищення надійності електропостачання досягається за рахунок використання акумуляторних батарей (АБ) великої ємності, розрахованої на декілька днів забезпечення автономності електропостачання споживача за відсутності енергоджерела [7-10]. Ці заходи одночасно з підвищенням рівня надійності електропостачання ведуть до подорожчання автономної системи в цілому, що відбивається на можливій області застосування СФЕС та ВЕУ для автономного електропостачання.

Необхідно підкреслити, що в умовах стабільного рівня приходу СР переваги розглянутих систем набувають особливого значення, тобто необхідний в кожному конкретному випадку рівень надійності електропостачання досягається за рахунок менших матеріальних витрат в порівнянні з областями, для яких характерні великі сезонні перепади швидкостей вітру або надходження СР.

Концептуально робота автономної системи електропостачання реалізується за допомогою різних рівнів управління. Ієрархічну структуру можна розділити на три рівні: перший, другий і третій, як показано на рисунку 2.1.

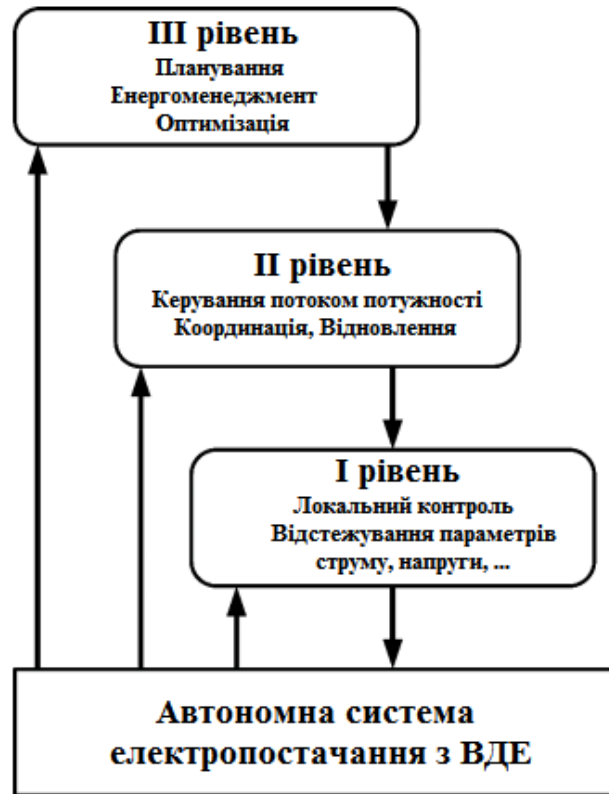


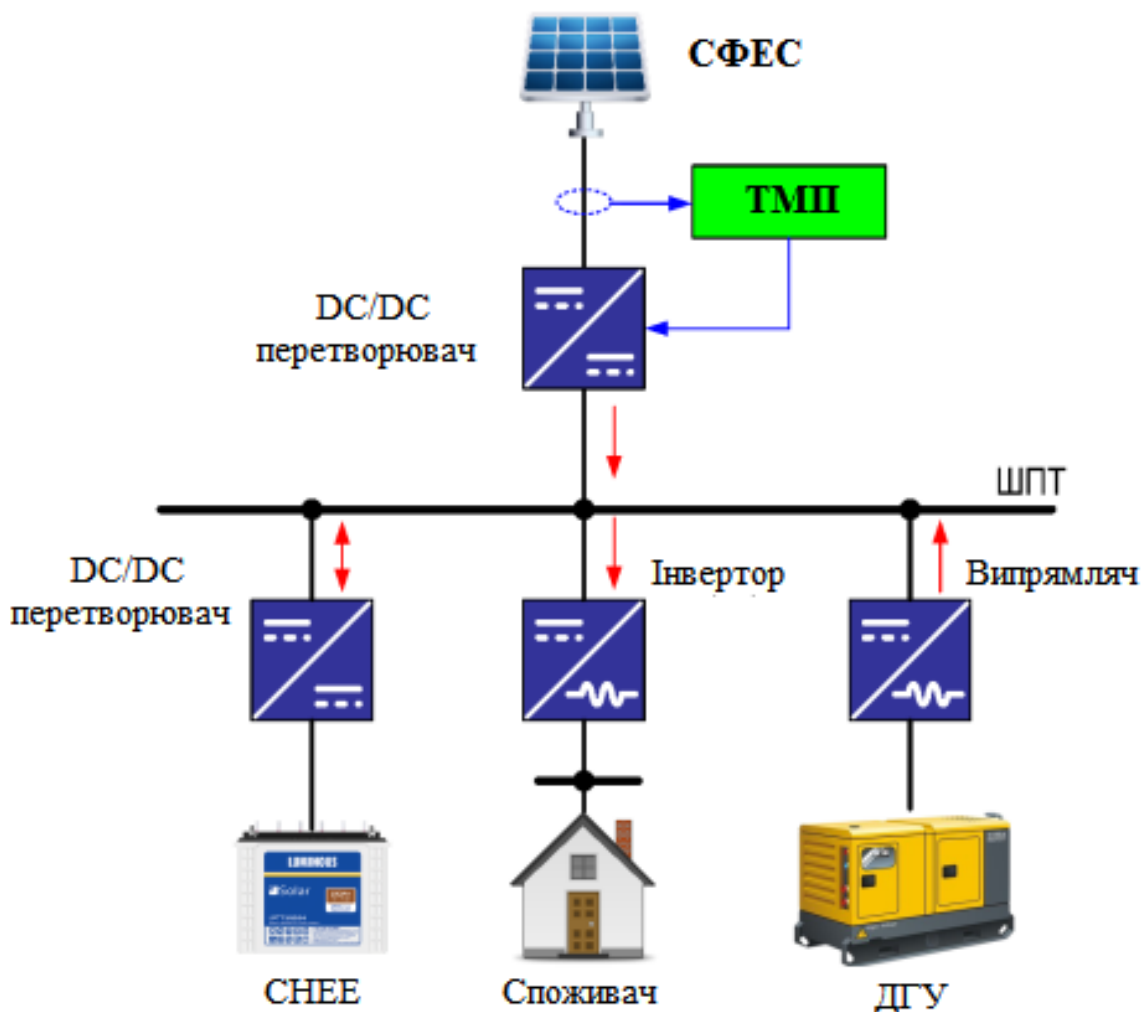
Рисунок 2.1 – Рівні контролю гібридної автономної системи ЕП

Первинне управління, яке є нижчим рівнем, відповідає за отримання результатів вимірювань показників струму, величини та частоти напруги та інших показників у режимі реального часу. Найбільш поширеним прикладом параметрів, що відстежуються, є зниження напруги, що виходить за регламентовані межі. Другий та третій рівні (вищі рівні) використовуються для оптимізації роботи автономної системи електропостачання на тривалих часових відрізках. Фундаментальна роль вищого рівня полягає в управлінні потоками електричної енергії від генеруючих установок, системи накопичення, а також в управлінні попитом споживача в рамках розподільчої мережі. Необхідно наголосити, що поняття «управління потужністю» та «управління енергією» істотно відрізняються один від одного. Суть такого

управління – досягнення певних цілей, наприклад, планування навантаження на генеруючі установки, раціональне енергоспоживання та оптимізація.

Другий рівень та відповідний йому контроль є проміжним етапом між першим та третім. Управління в такому разі має бути націлене на правильну координацію потоків електричної енергії та відновлення напруги на ШПС до номінального значення. Тому ключовими критеріями успішного контролю системи цьому рівні управління є миттєві значення електричних величин, які потребують малої вибірки за часом: десятки міль чи мікросекунд. Для третього рівня з огляду на довгострокову перспективу типовий час вибірки може становити хвилини або години.

Структурна блок-схема системи КСАЕП з використанням спільної шини постійного струму приведена на рисунку 2.2.



Рисунк 2.2 – Структурна блок-схема системи КСАЕП



Система складається з ФЕС, СНЕЕ та ДГУ. Передбачається, що автономна система електропостачання задовольняє потреби навантаження протягом дня від ФЕС та СНЕЕ при відключенні ДГУ, яка залежно від сезону року може включатися на потрібний час переважно у темний час доби. Крім того, СНЕЕ може компенсувати частину енергії під час пікового споживання, що дозволить знижувати встановлену потужність ДГУ.

Конструктивно ФЕС підключена до ШПС за допомогою однонаправленого DC/DC перетворювача з відстеженням точки максимальної потужності (ТМП). СНЕЕ з використанням, наприклад, літій-іонних акумуляторних батарей підключається до ШПС через двонаправлений DC/DC перетворювач.

Таким чином, рух потоку енергії для СНЕЕ можливий в обох напрямках. Навантаження та ДГУ підключені до ШПС через свої силові перетворювальні пристрої: мережний інвертор та випрямляч, відповідно. Таке топологічне рішення збільшує вклад ВДЕ у загальному енергетичному балансі системи. Для підтримки балансу потужності у ФДЕС необхідно використання центрального контролера із вбудованою системою інтелектуального керування потоків електроенергії (СІК). Виходячи з централізованого характеру управління, СІУ потрібна необхідна інформація про поточний стан електротехнічного комплексу для реалізації інтелектуальної логіки керуючих команд.

Основним технічним завданням ефективного використання СФЕС як джерела енергії є врахування мінливості рівня сумарної сонячної радіації, що надходить на фотоелектричний модуль. Цей вплив характеризується як сезонними і добовими коливаннями, так і кореляцією географічних координат місця розташування об'єкта електропостачання з величиною інсоляції від максимальних до мінімальних значень протягом досліджуваного проміжку часу (рисунок 2.3).

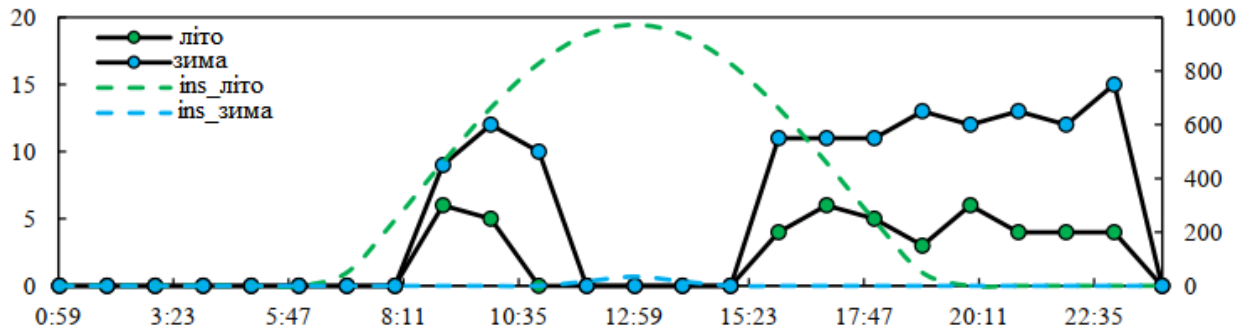


Рисунок 2.3 – Приклад сезонних середньодобових навантажень для АСЕП 15 кВт

Враховуючи описані вище технічні показники автономних систем електропостачання, необхідно розробити алгоритми керування гібридним енергокомплексом, спрямовані на зменшення кількості годин роботи існуючих ДГУ та збільшення їхнього коефіцієнта завантаження. Таке рішення дозволить не лише суттєво заощадити дизельне паливо, а й зменшити використання моторесурсу ДГУ. Технічна концепція ФДЕС на постійному струмі має передбачати накопичення надлишків фотоелектричної енергії для згладжування коливань споживання та пікових навантажень. У зв'язку з тим, що електрика подається для більшості розглянутих децентралізованих споживачів у ранковий та вечірній час, необхідно також закласти алгоритми роботи СНЕЕ, ємність якої має бути оптимальною для гібридної системи електропостачання, і дозволяла протягом певного часу покривати потребу в електроенергії при вимкненій ДГУ.

Запропонована на рисунку 2.3 структурна блок-схема комбінованої системи автономного електропостачання на основі спільної шини змінного струму є досить таки простою та має певні переваги від реалізації.





## **2.2 Визначення потенційних витрат електроенергії автономним споживачем**

Типове житло сільського жителя, що не має централізованого електропостачання, являє собою малоповерховий будинок з ділянкою землі, без звичних для нас сучасних зручностей. Це житло має властивості автономності, відносної стійкості, екологічною чистотою, що не відгороджує людину від природного оточення, але і не відповідає в належній мірі санітарно-гігієнічним вимогам.

До уваги в якості об'єкту електропостачання будемо приймати не просто звичайний приватний будинок, а мале фермерське господарство, яке спеціалізується на вирощуванні сільськогосподарських культур та тваринництві. Передбачається, що в такому приватному фермерському господарстві крім звичайного набору електрообладнання, яке має свій власний добовий графік споживання, є також спеціалізоване обладнання та машини для обслуговування потреб господарства.

Для визначення навантажень необхідно знати споживання електроенергії в господарстві протягом року. Обсяг споживання електроенергії влітку відрізняється від обсягу споживання взимку. Необхідну потужність електропостачання розраховуємо на основі середніх навантажень і середніх годин використання (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 Витрати електроенергії малім фермерським господарством

| № п/п | Електрообладнання  | Встановлена номінальна потужність, Вт |
|-------|--|---------------------------------------|
| 1.    | Типове навантаження побутового споживання приватного будинку:<br>- холодильник;<br>- кухонне приладдя/пристрої;<br>- телевізори;<br>- пральна машина;<br>- електроінструмент;<br>- бойлер;<br>- освітлення;<br>- насос (водопостачання). | 7000                                  |
| 2.    | Електричне опалення в розрахунку на опалювальну площу до 80 м <sup>2</sup> (в опалювальний сезон).   | 5500                                  |
| 3.    | Майстерня по обслуговуванню транспортних та інших сільськогосподарських засобів та приладдя.   | 2500                                  |
| 4.    | Токарний та столярний верстати, інше електрообладнання.  | 5500                                  |
| 5.    | Млин (виготовлення кормів, круп, сумішей).   | 3500                                  |
| 6.    | Електроспоживання та обслуговування приміщень по розведенню та утриманню сільськогосподарських тварин (корів, телят, свиней).  | 2800                                  |
| 7.    | Виробництво молочної та м'ясної продукції (пастеризатори, преси, дегідратори, печі...)   | 4500                                  |
| 8.    | Інше допоміжне обладнання.   | 2000                                  |
|       | Разом:   | <b>33300</b>                          |
|       | Коефіцієнт одночасності використання обладнання  | 0,72                                  |
|       | Загальна розрахункова потужність навантаження  | <b>23976</b>                          |

Треба відзначити, що обсяги виробництва електричної енергії установками відновлювальної енергетики (ВЕУ та ФЕС) у зимній період можуть бути суттєво меншими на відміну від літнього періоду. Деякі категорії вказаного в таблиці споживання є відсутніми у літній період, деякі – відсутні у зимній. Тому загальна розрахована потужність в цілому задовольнятиме нормальним умовам використання системи КАСЕП.

Для подальших розрахунків приймаємо розрахункову загальну потужність комплексної системи автономного електропостачання рівну 25 кВт.

Враховуючи низький ККД сонячних панелей та кубічну залежність вихідної потужності вітроелектричної установки від швидкості вітру приймаємо співвідношення потужностей ВЕУ та ФЕС як 15 кВт та 10 кВт.

Дизельна електростанція відіграє роль основної допоміжної установки на випадок, коли виробленої ВЕУ та СФЕС і акумульованої потужності не буде вистачати електропостачання господарства.

**Висновок:** Найбільш перспективним варіантом сполучення різнотипних енергетичних установок в одній енергетичній системі є використання проміжної вставки постійного струму. Застосування такого підходу має великі перспективи: комбінований енергетичний комплекс будується по агрегатному принципом, легко масштабується і при необхідності перебудовується. Розраховано потенційні витрати електронергії на прикладі фермерського господарства.



## **3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

### **3.1 Технічне обґрунтування вибору складових системи КАСЕП**

Однією з головних особливостей розроблюваної електростанції є її здатність забезпечити гарантоване електропостачання автономного споживача і дати йому можливість користуватися домашніми побутовими приладами.

До електричних генераторів, що застосовуються в вітроенергетичних установках, пред'являються особливі вимоги, що враховують особливість їх роботи. Однією з найважливіших особливостей є те, що генератор приводиться в обертання вітроколесом, швидкісний режим якого залежить від швидкості вітру і є непостійним [13].

В умовах мінливої швидкості вітру необхідно забезпечення необхідних характеристик генератора в широкому діапазоні швидкостей обертання, що призводить до збільшення розмірів і маси електричної машини в порівнянні з генераторами, розрахованими на сталий режим роботи. Навантаження генератора теж змінюється в процесі роботи. Вона залежить від потужності і числа підключених споживачів.

Аналіз різних типів електричних машин, придатних для застосування в вітроенергетичних установках показує, що питання вибору типу і конструкції генератора не однозначний. Наприклад, при використанні синхронної електричної машини із збудженням від постійних магнітів перевагою є відсутність необхідності забезпечення живлення обмоток збудження, і, як наслідок, відсутність електричних втрат в обмотці збудження [11]. При використанні електромагнітного збудження з'являється можливість регулювання вихідної напруги по колу збудження, але з'являються електричні втрати на збудження. Це відбувається тому, що при низькій швидкості обертання струм в обмотці збудження повинен збільшити

магнітний потік для компенсації зниження швидкості обертання, при цьому дедалі більша частина генерується буде витрачатися на збудження замість того, щоб бути відданою в навантаження [8]. Додатковим недоліком такої конструкції є необхідність передачі електричної енергії на обертову обмотку збудження, що ускладнює конструкцію і знижує її надійність.

Таким чином, для застосування в вітроенергетичних установках малої потужності найбільш доцільно застосовувати синхронні електричні машини з збудженням від постійних магнітів, інакше названі «вентильні електричні машини». Такі машини бувають з радіальним і осьовим магнітним потоком, при цьому можливі конструкції без використання магнітом'яких матеріалів в осерді якоря, що дозволяє ще більше знизити втрати. Додатковою перевагою є зниження реактивного моменту генератора, що є важливим при застосуванні в таких електричних машин в вітроенергетичних установках, оскільки пульсації реактивного моменту зазвичай призводять до небажаної вібрації конструкції ВЕУ і виникнення шуму [2].

Ситуація із вибором фотоелектричних панелей для сонячної електростанції є суттєво простіша. Вибір робимо на користь полікристалічних панелей, які мають помірний показник ефективності, що знаходиться на рівні 18%.

Техніко-економічні характеристики сучасних ДЕС свідчать про те, що вони є досить надійними і економічними джерелами електропостачання споживачів.

Електричні схеми ДЕС добре опрацьовані, накопичений великий досвід їх експлуатації, ринок електротехнічного обладнання пропонує велику номенклатуру серійних станцій різних типорозмірів від різних виробників.

## 3.2 Економічне обґрунтування вибору складових системи КАСЕП

### 3.2.1 Визначення капітальних вкладень

Вартість кожного із елементів системи КАСЕП представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Кошторис капіталовкладень

| Елементи електротехнічного комплексу                     | Ціна, грн.    |
|--|---------------|
| Синхронний генератор ГС-15                               | 28500         |
| Конструкція ВЕУ, встановлення                            | 18000         |
| Мережевий інвертор <b>GoodWe GW15K-DT (ВЕУ)</b>          | 75148         |
| Редуктор 1Ц2У 315К-25-12 ЦЦ У1(ВЕУ)                      | 14280         |
| Фотогальванічні панелі REC270PEBLACK (37 шт.)            | 118300        |
| Металоконструкції для монтажу панелей, кріплення         | 20000         |
| AGM аккумулятори EverExceed DP-12200 (8 шт. – 19,2 кВт)  | 112792        |
| Контролер WWS200A-360                                    | 41440         |
| Інвертор DiehlPlatinum 3000 Н (ФЕС)                      | 18262         |
| Інвертор DiehlPlatinum 7200TL (ФЕС)                      | 30400         |
| Додаткові пристрої системи КСАЕП                         | 12000         |
| Периферійні пристрої, комутаційні апарати                | 5600          |
| Кабель для ФЕС TUV Solar Cable 4 мм (100м.)              | 2800          |
| Дизельна ЕС <a href="#">Hyundai DHY 12000SE-3</a> 10 кВт | 116759        |
| <b>Загальна вартість</b>                                 | <b>614281</b> |
| Транспортні витрати та монтажні витрати (13%)            | <b>79857</b>  |
| Витрати на будівельні роботи (10%)                       | <b>61428</b>  |
| Капітальні витрати (інвестиції)                          | <b>755566</b> |

Для визначення капітальних вкладень потрібно до загальної вартості обладнання додати також і вартість його доставки, монтаж цього обладнання та витрати на будівництво. А також потрібно розрахувати амортизаційні відрахування.

Вартість доставки обладнання розраховуються в залежності від відстані, маси вантажу та тарифу залізничного перевезення на відстань одного кілометра тони вантажу. Монтажні роботи розраховуються відповідно до нормативів вартості монтажних робіт. Спростуючи розрахунок, вартість доставки та монтажних робіт, можна прийняти рівними 13% від загальної вартості обладнання:

$$C_{\text{ДМ}} = C_{\Sigma} \cdot 0,13 \text{ (грн.)}, \quad (3.2)$$

$$C_{\text{ДМ}} = 614281 \cdot 0,13 = 79857 \text{ (грн.)}.$$

Витрати на будівельні роботи (влаштування фундаментів) розраховують виходячи із нормативів витрат на будівництво. Даний норматив для укрупнення розрахунку приймається рівним 10% від вартості обладнання:

$$C_{\text{Б}} = C_{\Sigma} \cdot 0,1 \text{ (грн.)}, \quad (3.3)$$

$$C_{\text{Б}} = 614281 \cdot 0,1 = 61428,1 \text{ (грн.)}.$$

Амортизаційні відрахування знаходяться із добутку норми амортизації на первісну вартість об'єкту основних фондів:

$$A_{\text{P}} = \frac{C_{\Sigma} \cdot H_{\text{A}}}{100\%}, \quad (3.4)$$

де  $H_{\text{A}}$  – норма амортизації (при умові, що термін експлуатації ВЕУ приймемо за 20 років норма амортизації буде рівною 5%)

$$A_{\text{P}} = \frac{755566 \cdot 5\%}{100\%} = 37778 \text{ (грн.)}.$$



### 3.2 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу

Відповідно до правил улаштування електроустановок обслуговувати установки до 1000 В може робітник, у якого розряд не нижче п'ятого, а група допуску по електробезпеці не нижче третьої.

Розрахунок витрат на заробітну плату обслуговуючого персоналу виконується за наступною формулою:

$$C_3 = C_{30} + C_{3д}, \quad (3.5)$$

де  $C_{30}$  – основна заробітна плата по тарифу;

$C_{3д}$  – додаткова заробітна плата.

$$C_{30} = N \cdot T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{еф}} \cdot K_C \cdot \beta, \quad (3.6)$$

де  $N$  – кількість робітників які обслуговують установки КАСЕП ( $N = 1$  чол.);

$T_1$  – годинна тарифна ставка робітника першого розряду. Мінімальна заробітна платня станом на 2023р. не змінювалась і становить 6700 грн., тому розмір годинної тарифної ставки робітника першого розряду приймаємо рівним  $T_1 = 40$  грн.;

$K$  – тарифний коефіцієнт (для робітника четвертого розряду:  $K = 2,03$ . Приймаємо з таблиці 3.2);

$K_C$  – коефіцієнт співвідношень, що встановлений Генеральною угодою між профспілками і урядом ( $K_C = 1$ );

$\beta$  – відношення часу, затраченого робітником, на обслуговування установки відносно загального часу своєї роботи ( $\beta = 1$ );

$\Phi_{\text{еф}}$  – ефективний фонд часу обслуговування системи КАСЕП:

$$\Phi_{\text{еф}} = \varepsilon \cdot Z_{\text{РД}} \cdot Z_{\text{РЗ}} \cdot t_{\text{РЗ}}, \quad (3.7)$$

де  $\varepsilon$  – відносна тривалість увімкнення ( $\varepsilon = 0,5$ );

$Z_{РД}$  – кількість робочих днів за рік ( $Z_{РД} = 250$  днів/рік);

$Z_{РЗ}$  – кількість робочих змін ( $Z_{РЗ} = 1$ );

$t_{РЗ}$  – тривалість робочої зміни ( $t_{РЗ} = 1$ ).

Таблиця 3.2 – Тарифна сітка працівників погодинної оплати праці

|                     |   |     |     |      |      |     |
|---------------------|---|-----|-----|------|------|-----|
| Тарифні розряди     | I | II  | III | IV   | V    | VI  |
| Тарифні коефіцієнти | 1 | 1,5 | 1,8 | 2,03 | 2,33 | 2,7 |

Розраховуємо ефективний фонд часу обслуговування системи КАСЕП та основну заробітну плату по тарифу:

$$\Phi_{\text{еф}} = 0,5 \cdot 250 \cdot 1 \cdot 1 = 125 \text{ (год./рік)}.$$

$$C_{30} = 1 \cdot 40 \cdot 2,33 \cdot 125 \cdot 1 \cdot 1 = 11650 \text{ (грн.)}.$$

### 3.3 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання

Поточний ремонт електроустаткування проводиться на місці його встановлення із відключенням і зупинкою ремонтним персоналом.

Грошові витрати для проведення ремонтних робіт містять в собі витрати на комплектуючі, запасні частини та інші елементи, що потребують заміни, а також витрати на оплату праці працівників, що проводять ремонтні роботи. Найбільш складним з точки зору ремонтних робіт є обслуговування структурних вузлів фотоелектричної станції (ФЕС), оскільки вона складається із самодостатніх фотоелектричних модулів (37 шт.), кожен з яких, в разі потреби, доведеться демонтувати через несправність.

Графік планових попереджувальних ремонтних робіт представлено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Графік планових ремонтних робіт

| Найменування обладнання  | Види ремонтних робіт по місяцях |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | Трудоміст-ть, люд-год. |
|--------------------------|---------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|------------------------|
|                          | 1                               | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |                        |
| Вітрогенератор           |                                 |   |   | 4 |   |   |   | 4 |   |    |    | 4  | 12                     |
| Контролери заряду та АКБ |                                 |   | 3 |   |   |   | 4 |   |   |    | 6  |    | 13                     |
| Сонячні панелі           |                                 |   | 5 |   |   |   | 5 |   |   |    | 7  |    | 17                     |
| Кабельні мережі          |                                 |   | 4 |   |   |   | 4 |   |   |    | 4  |    | 12                     |
| Інвертори                |                                 |   |   | 4 |   |   |   | 5 |   |    |    | 6  | 15                     |
| ДГУ                      |                                 | 4 |   |   |   | 4 |   |   |   | 5  |    |    | 13                     |
|                          | Загальна трудомісткість         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 83                     |

Виконання даних ремонтних робіт, будемо вважати, проводитиметься електромонтером шостого розряду. Відповідно до того, що є відомими кількість годин виділених на проведення ремонтних робіт основна заробітна плата працівника знаходитиметься із наступної формули:

$$C_{\text{ЗОР}} = T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{ефр}} \text{ (грн.)}, \quad (3.8)$$

$$C_{\text{ЗОР}} = 40 \cdot 2,7 \cdot 83 = 8964 \text{ (грн.)}.$$

Фонд основної заробітної плати, грн./рік:

$$\Phi_o = \Phi(1+0,05+0,01+\alpha), \quad (3.9)$$

де  $\Phi$  – тарифний фонд  $\Phi_e$  експлуатаційних робітників або фонд прямої заробітної плати  $\Phi_p$  ремонтного персоналу, грн./рік;

0,01 – частка доплат за роботу у святкові дні;

0,05 – частка доплат за роботу в нічний час;

$\alpha$  – частка преміальних доплат для відповідної категорії робітників.

Величина основної заробітної плати для експлуатаційних робітників:

$$\Phi_{OE} = 11650 (1+0,05+0,01+0,2) = 14679 \text{ грн./рік.}$$

І для ремонтних:

$$\Phi_{OP} = 8964 (1+0,05+0,01+0,25) = 11743 \text{ грн./рік.}$$

Величина додаткової заробітної плати визначається в розмірі 15% від фонду основної заробітної плати. Тому сумарна величина фонду з врахуванням додаткової заробітної плати складе, грн./рік:

$$\Phi_{од} = \Phi_o \cdot 1,15 \quad (3.10)$$

Відповідно для обслуговуючого та ремонтного персоналу:

$$\Phi_{OED} = \Phi_{OE} \cdot 1,15 = 14679 \cdot 1,15 = 16881 \text{ грн./рік.}$$

$$\Phi_{OPD} = \Phi_{OP} \cdot 1,15 = 11743 \cdot 1,15 = 13504 \text{ грн./рік.}$$

Для формування фонду соціального страхування розраховується заробітна плата. З цього фонду витрачаються кошти на оплату тимчасової втрати працездатності, оплату декретної відпустки, санаторно-курортне лікування та відпочинок працівників, оздоровчу діяльність дітей працівників тощо.

Крім того, на заробітну плату здійснюються нарахування в пенсійний фонд та фонд зайнятості. Отже, витрати по заробітній платі ( $C_{ЗП}$ ) розраховуються так, грн./рік:

$$C_{ЗП} = \Phi_{OB} \cdot \left( 1 + \frac{\beta_{П} + \beta_{З} + \beta_{С}}{100} \right) (\text{грн./ рік.}) \quad (3.11)$$

де  $\beta_{П}$  – нарахування в пенсійний фонд,  $\beta_{П} = 32\%$ ;

$\beta_{З}$  – нарахування у фонд зайнятості,  $\beta_{З} = 1,5\%$ ;

$\beta_{С}$  – нарахування на соціальне страхування,  $\beta_{С} = 1,5\%$ .

Відповідно розраховуємо витрати по заробітній платі експлуатаційному персоналу:



$$C_{зп} = 16881 \cdot \left(1 + \frac{32 + 1,5 + 1,5}{100}\right) = 22789 \text{ (грн./ рік.)}$$

$$C_{зпр} = 13504 \cdot \left(1 + \frac{32 + 1,5 + 1,5}{100}\right) = 18230 \text{ (грн./ рік.)}$$

Таблиця 5.4 – Зозрахунок витрат по заробітній платі

| Показник             |   | Заробітна плата |
|----------------------|---|-----------------|
| $\Phi_{\epsilon}$    | Заробітна плата експлуатаційного персоналу      | 11650           |
| $\Phi_{р}$           | Заробітна плата ремонтного персоналу            | 8964            |
| $\Phi_{о\epsilon}$   | Величина основної ЗП експлуатаційного персоналу | 14679           |
| $\Phi_{ор}$          | Величина основної ЗП ремонтного персоналу       | 11743           |
| $\Phi_{о\epsilon д}$ | Основний фонд ЗП експлуатаційного персоналу     | 16881           |
| $\Phi_{ор д}$        | Основний фонд ЗП ремонтного персоналу           | 13504           |
| $C_{з\epsilon}$      | Витрати по ЗП експлуатаційного персоналу        | 22789           |
| $C_{зр}$             | Витрати по ЗП ремонтного персоналу              | 18230           |

### 3.4 Розрахунок терміну окупності системи КСАЕП

#### 3.4.1 Виробіток електричної енергії ВЕУ (15 кВт)

Розрахуємо кількість електроенергії, що виробить ВЕУ за один рік

$$W_{\text{річн}} = S_{\text{об}} \cdot C_{\text{р}} \cdot P_{\text{п.п.в.}} \quad (3.12)$$

де  $C_{\text{р}}$  – розрахунковий коефіцієнт потужності вітроколеса з горизонтальною віссю обертання в робочій точці (приймаємо рівним  $C_{\text{р}} = 0,476$ );

$S_{\text{об}}$  – площа обертання лопатей, яку охоплює вітроколесо при обертанні (згідно існуючих розрахунків для вітроколеса  $S_{\text{об}} = 78,5$ ).

$P_{\text{п.п.в.}}$  – природний потенціал вітру Вінницької області на висоті 15 метрів [35] ( $P_{\text{п.п.в.}} = 1120 \text{ (кВт}\cdot\text{год/м}^2\text{)/рік}$ ).

$$W_{\text{річн.}} = 78,5 \cdot 1120 \cdot 0,476 = 41850 \text{ (кВт}\cdot\text{год)}.$$

Виробіток та продаж відновлювальної електричної енергії відбувається згідно [Закону України "Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії" № 514.](#)

Відповідно до Постанови від 31 березня 2023 р. № 594 «Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію, вироблену генеруючими установками приватних домогосподарств» величина «Зеленого» тарифу» на електричну енергію, вироблену генеруючими установками приватних домогосподарств, встановлена потужність яких не перевищує 30 кВт та які введені в експлуатацію в період з 01 січня 2020 року по 31 грудня 2024 року, складає 635,07 коп/кВт·год (без ПДВ) Тобто за рік сума складе:

$$C_{P_{веу}} = 3,08 \cdot W_{річн.} \quad (3.13)$$

$$C_{P_{веу}} = 6,35 \cdot 41850 = 265747,5 \text{ (грн.)}$$

### 3.4.1 Виріток електричної енергії ФЕС (10 кВт)

Результати розрахунків по виробітку сонячної енергії зведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Фінансові показники ФЕС (10 кВт) по місяцям

| Місяць                      | Виріток,<br>(кВт год) | Власне спож-я<br>(кВт год) | Об'єм продажу в<br>мережу (кВт<br>год) | Дохід від<br>продажу,<br>грн. |
|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|--|-------------------------------|
| Січень                      | 335                   | 50                         | 285                                    | 1812,80                       |
| Лютий                       | 470                   | 50                         | 420                                    | 2671,49                       |
| Березень                    | 935                   | 50                         | 885                                    | 5629,22                       |
| Квітень                     | 1150                  | 50                         | 1100                                   | 6996,77                       |
| Травень                     | 1340                  | 50                         | 1290                                   | 8205,30                       |
| Червень                     | 1290                  | 50                         | 1240                                   | 7887,27                       |
| Липень                      | 1397                  | 50                         | 1347                                   | 8567,86                       |
| Серпень                     | 1310                  | 50                         | 1260                                   | 8014,48                       |
| Вересень                    | 998                   | 50                         | 948                                    | 6029,94                       |
| Жовтень                     | 776                   | 50                         | 726                                    | 4617,87                       |
| Листопад                    | 408                   | 50                         | 358                                    | 2277,13                       |
| Грудень                     | 280                   | 50                         | 230                                    | 1462,96                       |
| <b>За рік:</b>              | <b>10689</b>          | <b>600</b>                 | <b>10089</b>                           | <b>64173,10</b>               |
| <b>Податок</b>              |                       |                            |  | <b>12513,75</b>               |
| <b>Прибуток від продажу</b> |                       |                            |  | <b>51659,35</b>               |

Основні вхідні дані, прийняті для розрахунку:

Потужність ФЕС (PV-модулів) – 10 кВт.

Власне споживання – 50 кВт год/міс.

Вартість електроенергії (споживаної) – 2,64 грн./ кВт год.

Ставка оподаткування – 19,5 %.

Таким чином, в результаті проведеного розрахунку, було отримано величину прибутку від реалізації сонячної енергії, який складає:

$$Ц_{\text{рФЕС}} = 51659,35 \text{ (грн.)}$$

### 3.4.2 Термін окупності системи КАСЕП

Оскільки споживачу електричної енергії за рахунок виробітку власної електричної енергії не доводиться платити кошти для її придбання в електропостачальній організації, тому приймаємо отриману вигоду в кількості 600 кВт год в якості прибутку, але її вартість оцінюємо із врахуванням вартості придбання 1 кВт год для побутового населення, тобто:

$$Ц_{\text{спож.}} = 600 \cdot 2,64 = 1584 \text{ (грн)}.$$

Термін окупності розраховуємо за виразом:

$$T_{OK} = \frac{C_{\Sigma} + C_{DM} + C_B}{Ц_{Pвсy} + Ц_{Pфес} + Ц_{\text{спож.}} - C_{ПЕ} - C_{ПР} - A_p} \quad (3.14)$$

$$T_{OK} = \frac{614281 + 79857 + 61428}{265747,5 + 51659,35 + 1584 - 22789 - 18230 - 37778} = 3,15 \text{ (роки)}.$$

**Висновок:** Підводячи підсумок можна сказати, що досліджувана система КАСЕП в комплексі із врахуванням виконанням усіх робіт по її встановленню при величині природного потенціалу вітру та потенціалу сонячної енергії окупить себе за 3,15 роки.



## 4 ВИБІР ТА РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

### 4.1 Розрахунок параметрів сонячної фотоелектричної станції

Використання сонячної енергії для енергоживлення набуває все більшої популярності. Може здатися, що такі системи досить прості, тому що вони складаються з невеликої кількості компонентів: акумулятор, фотоелектричні модулі, інвертор, контролер заряду.

Однак, щоб всі ці елементи працювали злагоджено, як єдине ціле, необхідно вибрати їх правильно один до одного і коректно підключити.

Основним параметром, що характеризує систему на основі сонячної ФЕС, і в залежності від якого встановлюються інші параметри, є її потужність  $P_{\text{ФЕС}}$ , яка визначається за такою формулою:

$$P_{\text{ФЕС}} = P_{\text{ном.ФЕС}} \cdot f_{\text{ФЕС}} \cdot \left( \frac{G_T}{G_{\text{н.у.}}} \right) \cdot [1 + \alpha_p \cdot (T_C - T_{\text{н.у.}})] \quad (4.1)$$

де  $P_{\text{ном.ФЕС}}$  – номінальна потужність ФЕС, Вт;

$f_{\text{ФЕС}}$  – коефіцієнт зниження потужності ФЕС, який враховує втрати електроенергії без використання АБ;

$G_T$  – сонячна радіація, яка надходить на фотоелектричні модулі, Вт/м<sup>2</sup>;

$G_{\text{н.у.}}$  – пікова сонячна радіація, яка надходить на фотоелектричні модулі при нормальних умовах (1000 Вт/м<sup>2</sup>);

$\alpha_p$  – температурний коефіцієнт потужності, °С<sup>-1</sup>;

$T_C$  – температура поверхні ФЕС, °С ;

$T_{\text{н.у.}}$  – температура при нормальних умовах (25°С ).

Показник сонячної радіації, яка надходить на фотоелектричні модулі, визначається таким чином:

$$G_T = (G_B + G_d \cdot A_i) \cdot R_B + G_d \cdot (1 - A_i) \cdot \left[ \frac{1 + \cos\beta}{2} \right] \cdot \left[ 1 + f_0 \cdot \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] + \bar{G} \cdot \rho \left[ \frac{1 + \cos\beta}{2} \right], \quad (4.2)$$

де  $G_B$  – пряма сонячна радіація, Вт/м<sup>2</sup>;

$G_d$  – дифузна сонячна радіація, Вт/м<sup>2</sup>;

$R_B$  – відношення косинуса кута падіння променя на похилій поверхні до косинусу кута падіння на горизонтальній поверхні;

$A_i$  – індекс анізотропії ( $A_i = G_b / G_0$ ).

$G_0$  – середня сонячна радіація поза атмосфери землі, Вт/м<sup>2</sup>;

$\beta$  – нахил поверхні;

$f_0$  – коефіцієнт ( $f_0 = \sqrt{G_b / G}$ );

$G$  – сумарна сонячна радіація ( $G = G_b + G_d$ ), Вт/м<sup>2</sup>.

Приведемо розрахунок коефіцієнту зниження вироблення електроенергії СФЕС при генерації електроенергії за нормальних умов (таблиця 4.3).

Таблиця 4.1 – Розрахунок коефіцієнту зниження вироблення електроенергії СФЕС

| Параметри                          | Значення    | Діапазон   |
|------------------------------------|-------------|------------|
| Фотоелектричний модуль             | 0,95        | 0,80-1,05  |
| ККД інвертора                      | 0,92        | 0,88-0,97  |
| Схемні втрати                      | 0,98        | 0,97-0,995 |
| Комутаційні коробки                | 0,995       | 0,99-0,997 |
| Втрати в кабелях постійного струму | 0,98        | 0,97-0,99  |
| Втрати в кабелях змінного струму   | 0,99        | 0,98-0,993 |
| Забруднення поверхні               | 0,95        | 0,3-0,995  |
| Придатність системи                | 0,98        | 0,00-0,995 |
| Затемнення                         | 1,00        | 0,00-1,00  |
| Термін старіння                    | 1,00        | 0,7-1,00   |
| <b>Повний коефіцієнт втрат</b>     | <b>0,77</b> |            |

Вирібок електроеенергії від СФЕС виражається таким чином:

$$E_{\text{ФЕС}} = P_{\text{ФЕС}} \cdot t_{\text{сон.}}, \quad (4.3)$$

де  $t_{\text{сон.}}$  – середньодобові сонячні години (год/добу), які визначаються:

$$t_{\text{сон.}} = \frac{\text{кількість годин сонячного світла за рік}}{\text{кількість днів за рік (365 днів / рік)}}. \quad (4.4)$$

При використанні АБ в системі необхідно враховувати втрати в зарядному пристрої та АБ. Таким чином номінальна потужність СФЕС визначається виразом:

$$P_{\text{ном.ФЕС}} = \frac{E_{\text{СФЕС}}}{K_{\text{СФЕС}} \cdot t_{\text{пик.осв.}} \cdot (1 + \alpha_p \cdot (T_c - T_{\text{HY}}))} \cdot t_{\text{сон.}}, \quad (4.5)$$

де  $t_{\text{пик.осв.}}$  – розрахункові середньодобові освітленості в пікових годинах при стандартній сонячній радіації  $G_{\text{H.Y.}} = 1000 \text{ Вт/м}^2$ , визначається виразом:

$$t_{\text{пик.осв.}} = \left( \frac{G_T}{G_{\text{H.Y.}}} \right) \cdot t_{\text{сон.}}, \quad (4.6)$$

$K_{\text{СФЕС}}$  – загальний коефіцієнт, який враховує всі втрати при передачі енергії від СФЕС до споживача.

Споживання електричної енергії має бути рівним виробітку електроенергії від СФЕС. Таким чином, номінальна потужність СФЕС визначається таким чином:

$$\begin{cases} P_{\text{ном.ФЕС}} = \frac{H}{K_{\text{СФЕС}} \cdot t_{\text{пик.осв.}}}, \\ H = \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i \end{cases}, \quad (4.7)$$

де  $P_{\text{ном.ФЕС}}$  – номінальна потужність СФЕС (паспортна потужність при стандартних умовах  $T=25\text{C}$ ,  $CP=1000 \text{ Вт/м}^2$ ), Вт;

$H$  – добове споживання електроенергії споживачем, Вт год/добу;

$P_i$  – номінальна потужність окремої категорії споживання;

$t_i$  – добовий режим експлуатації категорії споживання, год/добу.

При виборі сонячних панелей для енергоживлення будинків або фермерських господарств необхідно відштовхуватись від низки технічних параметрів цих пристроїв:

- вид експлуатованих фотоелементів;
- вихідна напруга;

Одним з найважливіших показників системи електропостачання любого типу є його потужність, тобто кількість виробленої енергії. У випадку із сонячними панелями потужність сильно залежить від геометрії поверхні, а саме – від розмірів її площі (див. рисунок 4.1).

Структура поверхні кристалічних фотоелементів неоднакова. Полікристали орієнтовані в просторі по-різному, монокристали - однаково. Це впливає на особливості їх роботи в похмуру погоду. Перші виробляють невелику кількість енергії, другі - набагато менше. Цей факт буде корисний при виборі панелей в районах з великою середньорічною кількістю хмарних днів.

Якщо клімат місцевості в основному занадто хмарний, доцільно використовувати не кристалічні, а аморфні фотоелементи. Кріпляться вони на проблемні за структурою поверхні або на дах із полікарбонату (за допомогою спеціального клею). Аморфні елементи прекрасно уловлюють розсіяне сонячне світло, тому найбільш популярні в північній місцевості.

Останнім часом серед аморфних фотоелементів з'явився новий клас продукції – сонячні мікроморфні батареї. Ці пристрої фіксують наразі з звичайним (видимим очима) сонячним світлом ще і промені інфрачервоного спектру. Завдяки цій особливості вони не надто залежать від кута нахилу і сторони світу поверхні, на якій їх змонтують. Крім того, на їх виробництво витрачається менша кількість кремнію, що знижує собівартість продукції. Це в подальшому призведе ще до більшої їх популярності завдяки низькій вартості.

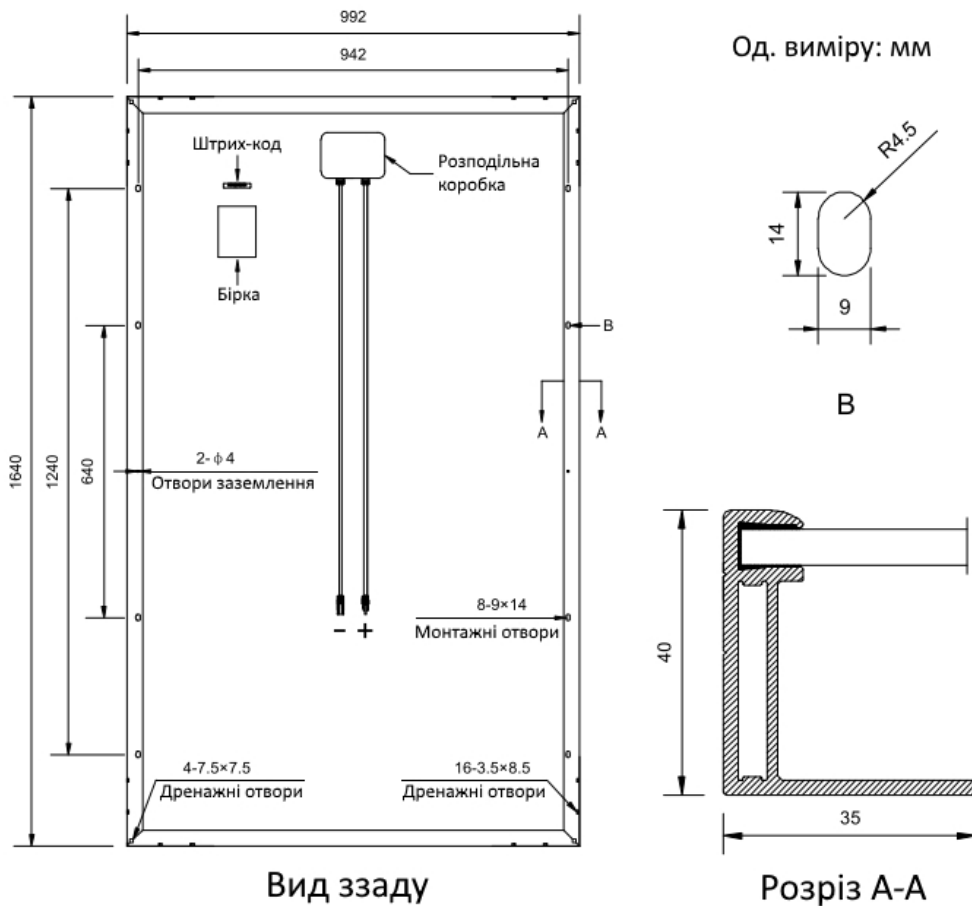


Рисунок 4.1 – Геометрія поверхні сонячних батарей ФЕС

Так, краще використовувати 1 панель з великою поверхнею, ніж кілька малих. Навіть якщо за сумою їх площі однакові, зносостійкість в першому випадку набагато вища, тому що кілька дрібних панелей потрібно з'єднати між собою, а це менш надійний варіант.

В основному вихідна напруга становить стандартно 12 В, але часто можна зустріти моделі потужністю 24 В. У більш потужних елементів є вигідні відмінності за фізичними параметрами - менші робочі струми, що забезпечує менший діаметр кабелів. Це позитивно впливає на надійність системи, тому що провідники будуть нагріватися в меншій мірі, а тому, і прослужать помітно довше.

Незважаючи на це, панелі з напругою 12 В є більш поширеними. Це пояснюється тим, що така напруга найбільш відповідає вхідній напрузі



інвертора і повністю підійде для невеликих систем енергопостачання приватних будинків. З'єднання елементів здійснюється в 2 етапи:

1. Спочатку деталі з'єднуються послідовно з утворенням рядів (їх ще називають «стрінги»). Це дозволяє отримати необхідну напругу системи.

2. Потім ці ряди з'єднують паралельно, щоб отримати оптимальне значення потужності струму.

ФЕС системи КСАЕП призначена для виробництва електроенергії шляхом безпосереднього перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію за допомогою фотогальванічних напівпровідникових полікристалічних модулів (панелей). Встановлення панелей передбачається виконувати на монтажних столах у напрямку на Південь. Кут нахилу відповідає  $30^{\circ}$ .

Технічні характеристики ФЕС приведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики ФЕС

| № п/п | Найменування технічної складової                                    | Кількість |
|-------|---|-----------|
| 1     | Загальна кількість фотогальванічних панелей потужністю 270 Вт (шт.) | 35        |
| 2     | Кількість інверторів DiehlPlatinum 3000 Н                           | 1         |
| 3     | Кількість інверторів DiehlPlatinum 7200TL                           | 1         |
| 4     | Номінальна потужність електростанції (кВт)                          | 10        |

Загальна кількість фотогальванічних панелей досліджуваної ФЕС складає 35 шт. одиничною потужністю 270 Вт виробництва компанії PeakEnergy.

Електрична потужність постійної напруги отримана з фотогальванічних панелей збирається по радіальній мережі до 1000 В в стрінгових інверторах.

Основною технологічною ланкою виробництва електроенергії є фотогальванічні панелі, які перетворюють електромагнітну енергію сонячної радіації безпосередньо в електричний струм постійної напруги.

Параметри панелей наведені для нормальних умов при інтенсивності сонячної радіації 1000 Вт/м<sup>2</sup> та температурі панелі 25С.

Специфіка підключення передбачає послідовне з'єднання панелей по 12 шт. в блоки. Електричні параметри блоків з панелей потужністю 270 Вт:  $P_m = 3,24$  кВт,  $U_{мп} = 374,4$  В,  $I_{мп} = 8,67$  А. Схему організації кабельних зв'язків у блоках фотогальванічних панелей наведено на кресленні в додатку Б.

Характеристики фотогальванічних панелей, застосовуваних в даній роботі, наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Основні параметри фотогальванічних панелей типу REC270PEBLACK (компанія PeakEnergy)

| № п/п | Найменування показника                                    | REC270PE BLACK |
|-------|---|----------------|
| 1     | Максимальна потужність, $P_m$                             | 270 Вт         |
| 2     | Струм короткого замикання, $I_k$                          | 9,29 А         |
| 3     | Напруга холостого ходу, $U_{xx}$                          | 38,6 В         |
| 4     | Напруга в режимі видачі максимальної потужності, $U_{мп}$ | 31,2 В         |
| 5     | Номінальний струм, $I_{мп}$                               | 8,67 А         |
| 6     | Габаритні розміри (Д, Ш, Т), мм                           | 1665x991x38    |
| 7     | Вага  | 19кг           |
| 8     | Відносне значення ефективності                            | 16,4 %         |

Перетворення потужності, що генерується фотогальванічними панелями з постійної напруги на змінну відбувається у стрінгових інверторах. В роботі передбачено встановлення 1-го стрінгового інвертора

типу Platinum 3000Нта 1-го стрінгового інвертора типу Platinum 7200 ТЛвиробництва компанії Diehl.

#### 4.2 Деталізація характеристик та вибір ДГУ системи КСАЕП

Робота дизель-електростанції (ДЕС) в складі системи КСАЕП в умовах мінливості навантаження, швидкості вітру та характеристик освітленості пов'язана з високою нерівномірністю завантаження дизельного агрегату, що позначається на його ефективності – паливній складовій вартості 1 кВт-год електроенергії.

Ефективний режим роботи ДЕС забезпечується тільки при завантаженні станції від 70 до 100%, в іншому випадку зі зменшенням коефіцієнта завантаження ДЕС відбувається різке зниження ефективності її роботи. При цьому завантаження ДЕС від 35 до 70% може бути умовно прийнятним з підвищеною питомою витратою палива. Менше завантаження ДЕС є неприпустимим, оскільки супроводжується різким стрибком питомого споживання палива (рисунок 4.2).

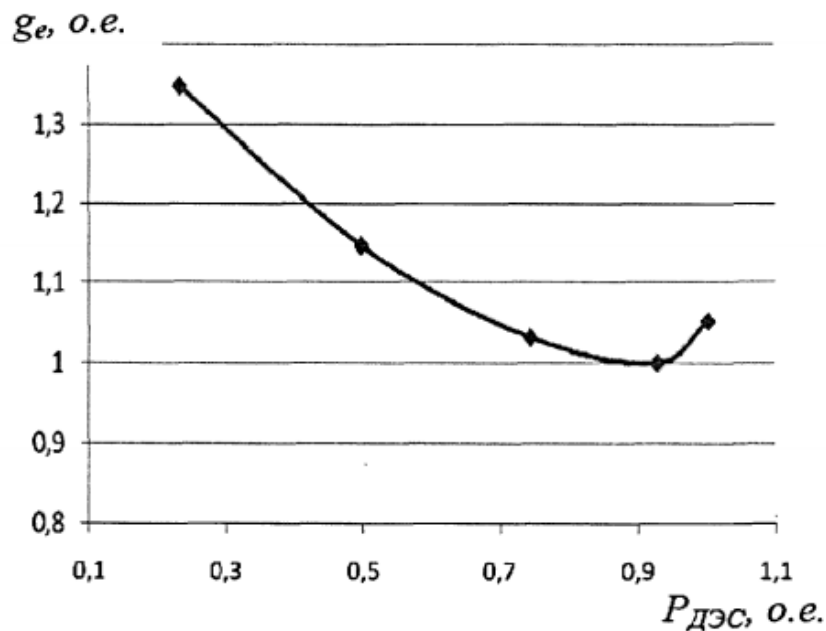


Рисунок 4.2 – Питома витрата палива ДГУ інверторного типу зі змінною частотою обертання валу генератора

З рисунка 8.1 видно, що робота ДГУ зі змінною частотою обертання валу генератора з подальшим перетворенням електроенергії в інверторі дозволяє підвищити ефективність роботи ДГУ в режимах неповного завантаження в порівнянні з типовою ДГУ, яка працює на постійних оборотах двигуна.

Таким чином, застосування ДГУ з генераторами на постійних магнітах, які працюють зі змінною частотою обертання валу генератора (двигуна) і подальшим перетворенням електроенергії до потрібної постійної частоти в інверторі, є найбільш виправданим в складі КСАЕП з СФЕС.

Враховуючи вище сказане вибираємо в якості ДГУ системи КСАЕП станцію Hyundai DHY 12000SE-3 (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 – ДЕС типу HyundaiDHY 12000SE-3

Характеристики ДГУ Hyundai DHY 12000SE-3:

- Напруга: універсальна(220/380В).
- Двигун: Hyundai.
- Максимальна потужність: 11 кВт.
- Тип запуску: електростарт.
- Матеріал обмотки альтернатора: мідь.

- Корпус: шумозахищений.
- Час безперервної роботи: 20.8 год.

Переваги вибраного пристрою:

- універсальність (робота від 1-ї або 3-х фаз): унікальна система перемикання фаз дозволяє використовувати генератор як в однофазному (230V), так і в трифазному (380V) режимі без втрати потужності;
- підвищений рівень безпеки: електричні дроти та кабелі надійно ізолювані. Заземлення корпусу апарата захищає від ураження електричним струмом. Система аварійного відключення убезпечить генератор від перегріву при роботі на максимальних навантаженнях;
- економічна витрата палива: дизельний двигун має досить низьку витрату палива - 1 л / год, забезпечуючи 10 кВт електроенергії;
- довгий ресурс компонентів: генератор зібраний на спеціалізованому конвеєрі з дотриманням світових стандартів якості. Корпус має антикорозійне покриття. Довговічність силового агрегату забезпечує система повітряного охолодження.

#### **4.3 Вибір контролера керування дизель-генераторної установки**

В якості контролера керування режимами роботи ДГУ приймаємо контролер компанії Deer See Electronics серії 6120.

За допомогою модуля серії DSE 6120 користувачі мають можливість здійснювати запуск та зупинку двигуна/генератора, а також, за потреби, - перемикання навантаження. Спеціальний рідкокристалічний дисплей дозволяє оперативно контролювати робочі параметри системи.

Модуль DSE 6120, крім того, стежить за роботою двигуна та виконує його автоматичну зупинку. Рідкокристалічний дисплей відображає інформацію про стан роботи двигуна, а також докладну інформацію про поточні несправності та роботу в аварійному режимі.



Зовнішній вигляд контролера 6120 та його характеристики приведені на рисунку 4.4 та 4.5 відповідно.

#### KEY FEATURES

- Large back-lit text display
- Multiple display languages
- Heated display option available
- DSENet® expansion compatible
- Data logging facility
- Fully configurable via PC using USB communication
- Front panel configuration
- Efficient power save mode
- 3 phase generator sensing
- 3 phase mains (utility) sensing (DSE6120 MKII only)
- Generator/load power monitoring (kW, kV A, kV Ar, pf)
- Generator/load current monitoring and protection
- Breaker control via fascia buttons
- Fuel and start outputs, configurable when using CAN
- 4 configurable DC outputs
- 4 configurable analogue/digital inputs
- Support for 0 to 10 V & 4 to 20 mA oil pressure sensors
- 6 configurable digital inputs
- Configurable staged loading outputs

- CAN, MPU and alternator speed sensing in one variant
- 3 engine maintenance alarms
- Engine speed protection
- Engine hours counter
- Engine pre-heat
- Engine run-time scheduler
- Engine idle control for starting & stopping
- Fuel pump control
- Real time clock
- Battery voltage monitoring
- Start on low battery voltage
- Configurable remote start input
- 1 alternative configuration
- Comprehensive warning, electrical trip or shutdown protection upon fault condition
- LCD and LED alarm indication
- Customisable information screens
- Configurable event log (100)

#### KEY BENEFITS

- Automatically transfers between mains (utility) and generator (DSE6120 MKII only)
- Increased input and output expansion capability via DSENet®
- Hours counter provides accurate information for monitoring and maintenance periods
- User-friendly set-up and button layout for ease of use
- Multiple parameters are monitored simultaneously which are clearly displayed on a large back-lit text display via multiple languages
- The module can be configured to suit a wide range of applications
- Compatible with a wide range of CAN engines including Tier 4
- Uses DSE Configuration Suite PC Software for simplified configuration
- Licence-free PC software
- IP65 rating (with optional gasket) offers increased resistance to water ingress

Рисунок 4.4 – Характеристики та переваги контролера серії 6120

#### DSE6120 MKII



Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд контролера DSE 6120

Модуль спроектований на основі потужного мікропроцесора, завдяки чому має велику кількість вбудованих стандартних функцій:

- рідкокристалічний дисплей, що працює в текстовому режимі.
- Контроль справжнього середньоквадратичного значення напруги.
- Контроль робочих параметрів двигуна.
- Можливість довільного налаштування всіх входів для роботи з аварійними сигналами та широким набором інших функцій.
- Інтерфейс з електронним блоком керування (ECU) двигунів з електронним керуванням.
- Інтерфейс з електромагнітним датчиком, що використовується в додатках, які потребують лише керування двигуном.

Ряд робочих алгоритмів, таймерів та обробників аварійних сигналів можуть бути змінені користувачем за допомогою ПК із програмним забезпеченням для налаштування модулів серії 6000.

#### **4.4 Вибір проміжного накопичувача енергії**

З огляду на нестабільний, змінний характер вітру, миттєве вироблення електроенергії ВЕУ також схильне до значних коливань. Для цього на базі ВЕУ та ФЕС створюються автономні електротехнічні комплекси з використанням автономних електроагрегатів, що працюють на вуглеводневому паливі, а також проміжних (буферних) накопичувачів енергії.

Зазвичай в ролі накопичувачів енергії виступають хімічні джерела струму (ХДС) – акумуляторні батареї (АКБ) в яких хімічна енергія активних речовин безпосередньо перетворюється в електричну енергію. Кількість енергії, що запасється в АКБ, визначається добутком номінальної напруги на ємність батареї, при цьому ємність і напруга однієї АКБ (одного елемента) обмежені.

Для вибору необхідного типу буферного джерела постійного струму проведено порівняльний аналіз найбільш поширених типів ХДС, результати якого представлені в таблиці 5.1 [4].

Згідно з наведеними в таблиці 5.1 даними видно, що літій-іонні акумулятори мають найкращі питомі характеристики і при цьому мають найбільшу робочу напругу елемента в порівнянні з іншими ХДС. При цьому у них досить низький саморозряд, а також найвищий коефіцієнт віддачі по ємності (близький до 1). Використання літій-іонних акумуляторів може значно знизити масогабаритні показники системи буферного накопичення енергії в складі КСАЕП.

В якості батарей виберемо акумуляторні батареї EverExceed DP-12200.

Герметична необслуговувана акумуляторна батарея EverExceed DP-12200 серії Deep Cycle (серія акумуляторів для глибоких розрядів) з електричної ємністю 222 Ач виконана за сучасною технологією AGM нового покоління – особлива чистота (99,9%) та інноваційний склад активних матеріалів пластин акумулятора, що дозволило поліпшити основні показники роботи акумулятора, в першу чергу циклічний ресурс роботи акумулятора збільшено до 700 циклів розряду/заряду з глибиною до 100%, а також покращилися разрядно/зарядні характеристики акумуляторних батарей.

Таблиці 4.1 – Характеристики вибору АКБ

| Характеристики   | Перезаряджувані ХДС  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  | Свинцево-кислотні (СКБ)  | Нікель-кадмієві (NiCd)                         | Нікель-металогідридні (NiMH)                   | Літій-іонні (Li-ion)   |
| Робоча напруга елемента, В   | 2,0  | 1,2-1,25                                       | 1,2-1,25                                       | 3,6  |
| Типова ємність, А год  | 0,7-20   | 0,03-20  | 0,05-13,5                                      | 0,4-6  |
| Діапазон робочих температур, С   | -20... +50   | -40...+60                                      | -20...+40                                      | -20...+60  |
| Енергетична щільність, Вт/кг   | 30-50  | 45-80  | 60-120   | 100-160  |
| Питома енергія:<br>- вагова, Вт год/кг;<br>- об'ємна, Вт год/дм <sup>3</sup> | 25-50<br>55-100  | 30-60<br>100-170                               | 40-80<br>150-240                               | 100-180<br>25-400  |
| Струм навання від С:<br>- піковий;<br>- оптимальний                          | 5С<br>0,2С   | 20С<br>1С                                      | 5С<br>До 0,5С                                  | >2С<br>До 1С   |
| Кількість циклів заряд/розряд до зменшення ємності до 80%                    | 200-1000   | До 1500  | 300-500  | 300-1000   |
| Форма кривої розряду   | Похила   | Пласка   | Пласка   | Пласка   |
| Час швидкого заряду, год   | 8-16   | 1  | 2-4  | 2-4  |
| Чутливість до перезаряду   | низька   | середня  | висока   | висока   |
| Саморозряд при 20 С в місяць, %  | 5  | 15-20  | 30   | 10   |
| Особливості експлуатації   | Значне зниження ємності при збільшенні струму розряду та низькій температурі | Струми розряду до 3-8С. можливий швидкий заряд | Струми розряду до 3-8С. можливий швидкий заряд | Необхідний захист від перезаряду та великих зарядних струмів |

Характеристики EverExceedDP-12200:

- ємність акумуляторної батареї – 2,4 кВт;
- кількість циклів – 700;
- термін служби – 12 років;

- ККД батареї – 99%;
- номінальна ємність – 222 Агод;
- розміри – 305 x 168 x 215 мм;
- внутрішній опір – 4 МОм;
- вага – 27,5 кг;
- робоча температура – 0 – 45 С.

Для забезпечення акумуляціїнеобхідної кількості електроенергії у розмірі 20 кВт вибираємо 8 акумуляторних батарей по 2,4 кВт кожна. Загальна отримана потужність запасеної енергії складатиме 19,2 кВт.



#### 4.5 Вибір стрінгових інверторів ФЕС 10 кВ

Перетворення потужності, що генерується фотогальванічними панелями з постійної напруги на змінну відбувається у стрінгових інверторах. В роботі передбачено встановлення 1-го стрінгового інвертора типу Platinum 3000Н та 1-го стрінгового інвертора типу Platinum 7200 TL виробництва компанії Diehl. Основні характеристики вище згаданих інверторів приведені в таблицях 4.6 та 4.7 відповідно.

Таблиця 4.2 – Основні характеристики інвертора Platinum 3000 Н

| <b>Вхідні параметри інвертора (DC)</b>                  | <b>Значення параметра</b> |
|---|---------------------------|
| Максимальна потужність при постійному струмі, кВт       | 3,0                       |
| Максимальне значення напруги при постійному струмі, В   | 600                       |
| Максимальний струм на кожний МРРТ, А                    | 13,5                      |
| Максимальний вхідний струм, А                           | 20,2                      |
| Діапазон МРРТ на 100% потужності, В                     | від 230 до 480            |
| Максимальна кількість входів                            | 3                         |
| Кількість МРРТ трекерів                                 | 1                         |
| <b>Вихідні параметри інвертора (AC)</b>                 |                           |
| Номінальна активна потужність, кВт                      | 2,9                       |
| Максимальна повна потужність, кВА                       | 2,9                       |
| Максимальна активна потужність ( $\cos\varphi=1$ ), кВт | 2,9                       |
| Номінальна напруга, В                                   | 230 (+/-20%)              |
| Номінальна частота, Гц                                  | 50 (+/-10%)               |
| Номінальний струм, А                                    | 13                        |
| Кількість фаз/кількість виходів                         | 1/3                       |
| Коефіцієнт потужності, $\cos\varphi$                    | 0,9                       |
| <b>Загальні параметри інвертора</b>                     |                           |
| Діапазон робочих температур, $^{\circ}\text{C}$         | від -25 до+65             |
| Відносна вологість, %                                   | від 4 до99%               |
| Клас захисту оболонки                                   | IP65                      |
| Висота установки, м                                     | від 0 до2000              |
| Габаритні розміри (ШхДхВ), мм                           | 610 x 353 x 154           |
| Вага, кг  | 19                        |

Таблиця 4.3 – Основні характеристики інвертора Platinum 7200 TL

| <b>Вхідні параметри інвертора (DC)</b>                | <b>Значення параметра</b> |
|---|---------------------------|
| Максимальна потужність при постійному струмі, кВт     | 7,2                       |
| Максимальне значення напруги при постійному струмі, В | 880                       |
| Максимальний струм на кожний МРРТ, А                  | 21                        |
| Діапазон МРРТ на 100% потужності, В                   | від 351 до 710            |
| Максимальний вхідний струм, А                         | 26                        |
| Максимальна кількість входів                          | 3                         |
| Кількість МРРТ трекерів                               | 1                         |
| <b>Вихідні параметри інвертора (AC)</b>               |                           |
| Номінальна активна потужність, кВт                    | 6,9                       |
| Максимальна повна потужність, кВА                     | 6,9                       |
| Номінальна напруга, В                                 | 230 (+/-20%)              |
| Номінальна частота, Гц                                | 50 (+/-20%)               |
| Номінальний струм, А                                  | 30                        |
| Кількість фаз/кількість виходів                       | 1/1                       |
| Коефіцієнт потужності, cosφ                           | 0,7                       |
| <b>Загальні параметри інвертора</b>                   |                           |
| Діапазон робочих температур, °С                       | від -20 до +60            |
| Відносна вологість, %                                 | від 0 до 95%              |
| Клас захисту оболонки                                 | IP66                      |
| Висота установки, м                                   | від 0 до 2000             |
| Габаритні розміри (ШхДхВ), мм                         | 720 x 320 x 250           |
| Вага, кг  | 29                        |

Висновок: Результатом виконання даного розділу є вибір вибір АКБ, інверторів та контролера ДГУ досліджуваної системи КСАЕП на основі відновлювальних джерел енергії.

## 5 РОЗРОБКА СХЕМ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИНЦИПОВИХ ПІДСИСТЕМ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Грунтуючись на попередньо приведеній структурній схемі, в процесі роботи над універсальним контролером була розроблена схема електрична принципова, докладно описана далі. Основною технічною функцією комплексної системи автономного електропостачання є узгодження режимів виробництва і споживання енергії в ізольованій енергетичній системі, що містить установки відновлюваної енергетики.

Для виконання основної функції – забезпечення балансу потужностей в системі, необхідно контролювати значення основних електричних параметрів: струмів і напруг усіх силових агрегатів і навантажень, підключених до системи електропостачання, а також параметрів самого накопичувача. Для цього на збірних шинах споживача і шині постійного струму встановлюються всі необхідні датчики, вихідні сигнали з яких надходять в блок датчиків, де вони нормуються, обробляються і подаються в систему управління (СК).

Необхідною елементом КАСЕП є блок базових функцій, що включає в себе блок сенсорів, блок заряду-розряду, безпосередньо накопичувач енергії і систему керування.

Система керування реалізує простий алгоритм управління режимами роботи автономної електростанції, основними функціями якого є забезпечення балансу потужностей в ізольованій енергетичній системі та раціональних режимів заряду/розряду акумуляторних батарей.

Дана стратегія керування може бути реалізована при побудові КАСЕП на базі мікроконтролера, в програму якого жорстко вшиті технічні характеристики використовуваних АБ.

Принципова електрична схема системи КСАЕП приведена на рисунку 5.1.

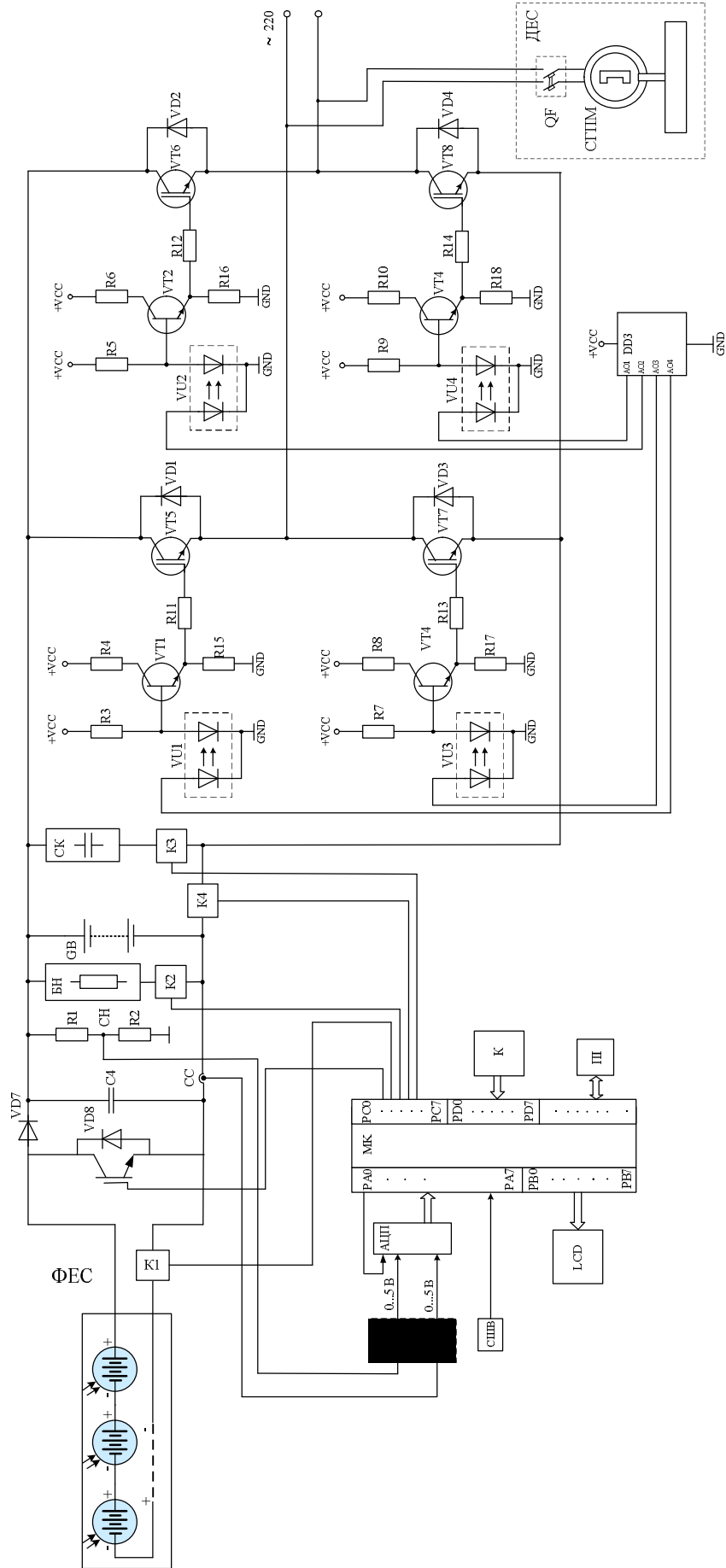


Рисунок 5.1 – Схема електрична принципова системи КСАЕП

На рисунку 5.1 приведені такі позначення: МК – мікроконтролер; DC/DC – перетворювач постійного струму; БН – баластні навантаження; GB – акумуляторна батарея; СК – суперконденсатор; К1-К4 – ключі-контактори; ДЕС – дизель-електрична станція; QF – автоматичний вимикач.

У запропонованій схемі КАСЕП основними джерелами електроенергії служать ВЕУ та ФЕС. Необхідна кількість ВЕУ, ФЕС та ДЕС визначається необхідним ступенем надійності електропостачання споживачів із врахуванням одиничних номінальних потужностей установок і станцій.

Для формування керуючих сигналів система керування використовує три види вхідних змінних:

- змінні контролю поточних параметрів режиму;
- зовнішні змінні;
- внутрішні змінні.

Змінні контролю поточних параметрів використовуються для управління перетіканнями потужності в енергетичній системі та формування сигналів зворотного зв'язку.

Зовнішні змінні необхідні для визначення раціональних робочих режимів генеруючих установок поновлюваної енергетики з точки зору максимального використання первинних енергоносіїв.

Внутрішні змінні застосовують для встановлення основних енергетичних співвідношень, використовуваних в системі енергетичних установок. Внутрішні змінні визначаються за даними технічної специфікації використовуваного силового обладнання і заносяться в пам'ять контролера у вигляді відповідних таблиць на етапі конфігурації системи управління.

Для практичної реалізації запропонованої стратегії управління режимами комбінованих автономних енергетичних комплексів необхідна розробка спеціалізованого технічного пристрою, побудованого на базі буферної системи накопичення енергії.

Алгоритм роботи комбінованої системи автономного енергопостачання розглядатиметься в наступному розділі роботи.

Однолінійна схема підключення контролера DSE 6120 до дизель-генераторної установки приведена на рисунку 5.2.

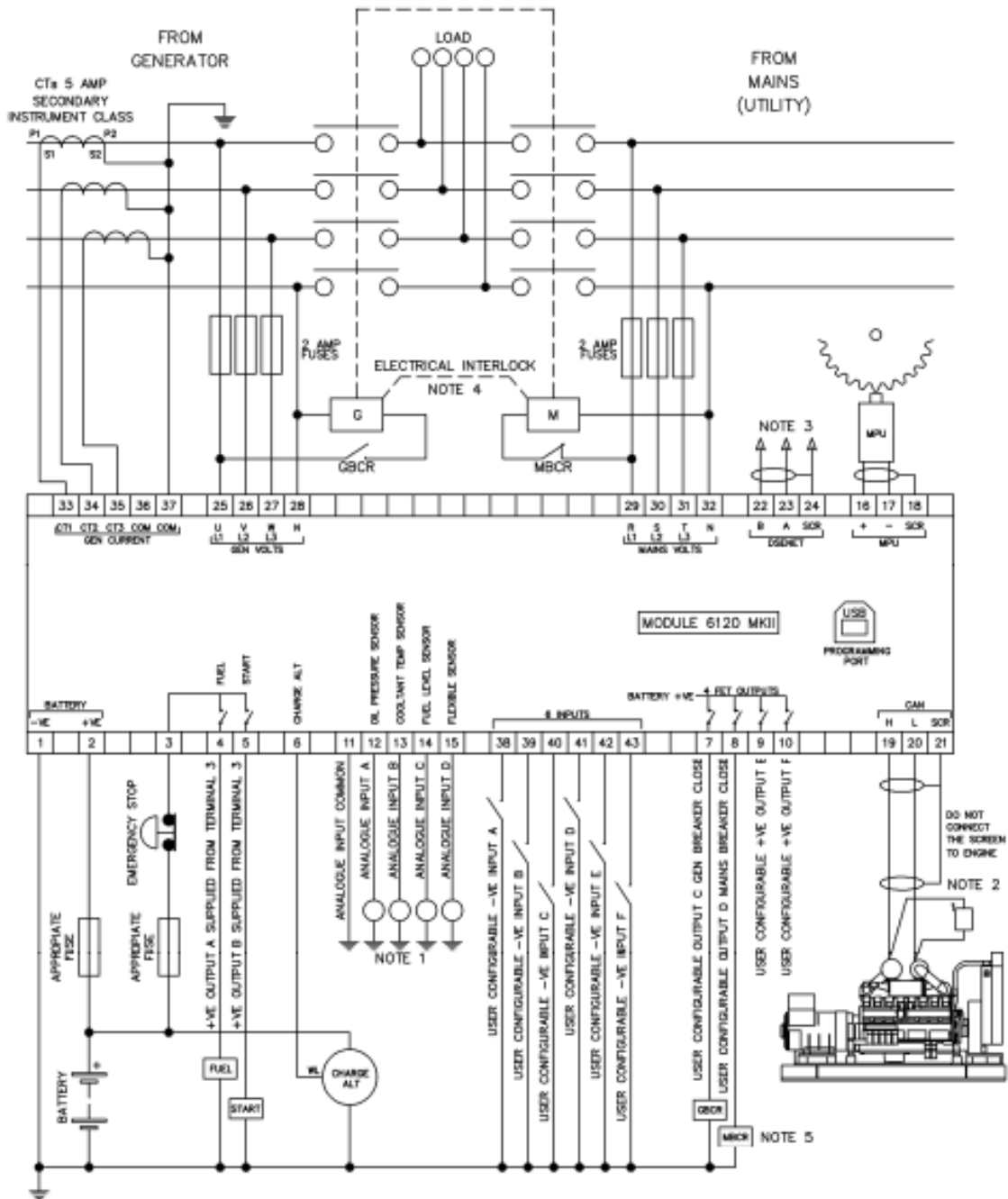


Рисунок 5.2 – Схема електрична принципова підключення МК DSE 6120

Для забезпечення різних режимів роботи генераторної установки з метою регулювання її продуктивності та адаптації до діючих електричних установок контролер пропонує різні схеми топології електричних з'єднань обмоток, приведені на рисунку 5.3.



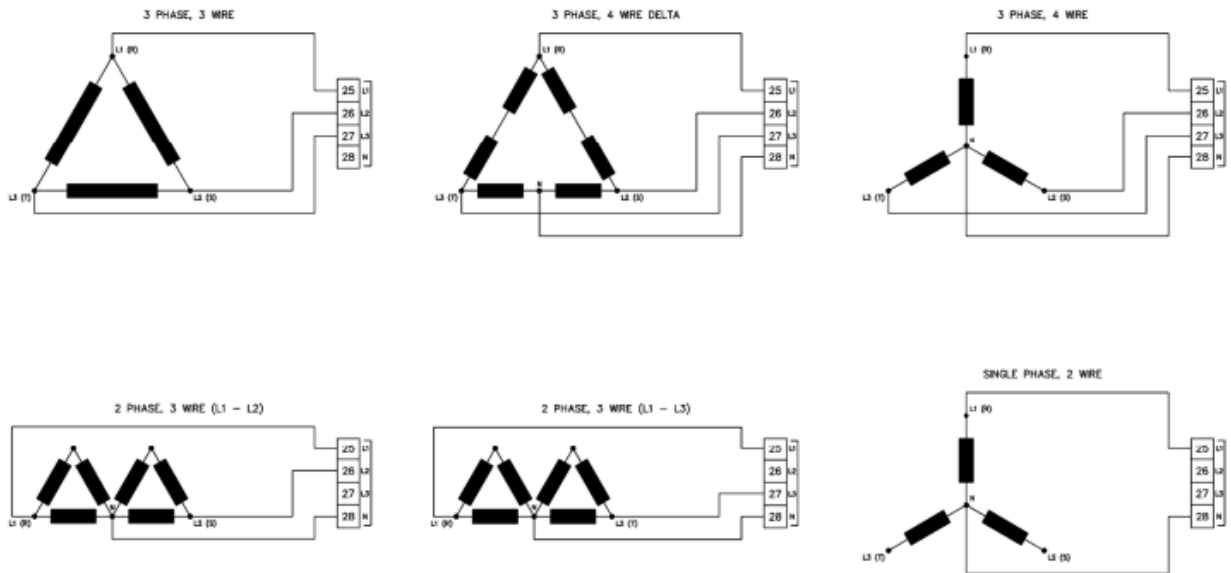


Рисунок 5.3 – Топологія підключення обмоток ДГУ через DSE 6120

Однолінійна принципова електрична схема фотоелектричної станції комбінованої системи автономного електропостачання на основі відновлювальних джерел енергії приведена на рисунку 5.4. На схемі не показані АКБ та можливість запасання виробленої електричної енергії в акумуляторних батареях. На схемі показаний варіант підключення ФЕС безпосередньо через стрінгові інвертори із можливістю безпосереднього споживання електричної енергії або продаж її в мережу згідно «зеленого» тарифу.

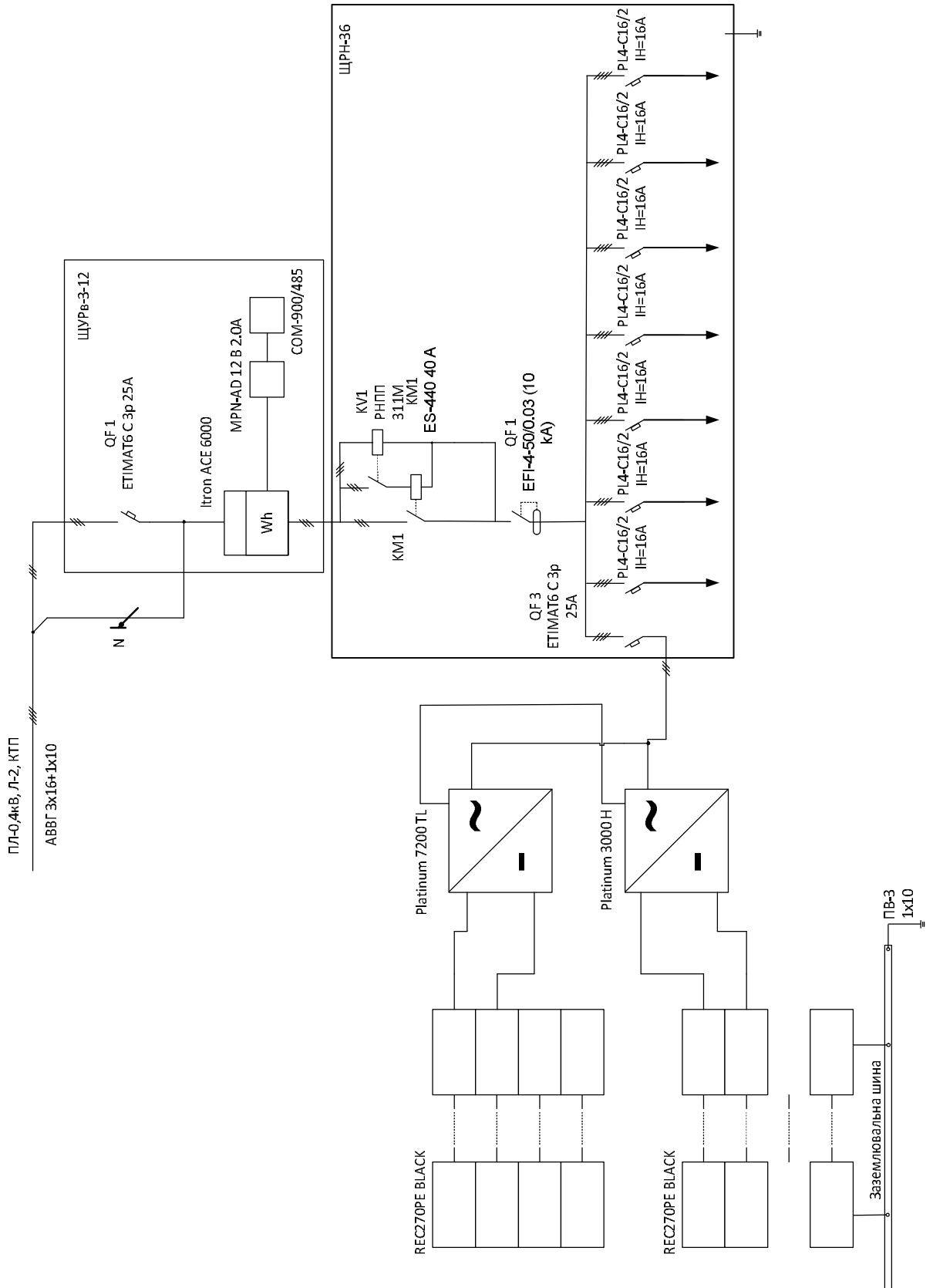


Рисунок 5.4 – Однолінійна принципова електрична схема СФЕС КАСЕП

## 6 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ФОТОДИЗЕЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Для розробки адаптивних алгоритмів, що оцінюють узгоджену роботу кількох генеруючих джерел загального споживача, необхідно зв'язати систему управління джерел з роботою центрального контролера. Алгоритм їх функціонування повинен забезпечити гарантоване постачання електричного навантаження, яке запитує споживач, у зазначених вище експлуатаційних режимах. При цьому необхідно врахувати кілька обмежень, що накладаються на роботу ФДЕС. Встановлена номінальна потужність робочих дизель-генераторів електростанції  $P_{д.ном.}$  повинна забезпечувати покриття максимального навантаження споживача  $P_{н макс.}$ :

$$P_{д\_ном} \geq P_{н\_макс} \quad (6.1)$$

В свою чергу частина енергії, запасена в накопичувач, повинна забезпечувати покриття максимального електричного навантаження на час перемикання в буферному режимі  $W_{буф.}$  та тривалою роботою в циклічному режимі цикл.  $W_{цикл.}$

Мінімальна величина часу перемикання  $t_{пер.}$  визначається часом пуску та виведення на номінальний режим ДГ і визначається залежно від його типорозміру від кількох секунд до хвилин. Реальна величина  $t_{пер.}$  залежить від характеру зміни добового графіка навантаження, встановлених потужностей СФЕС та ДГУ та може становити до кількох годин. Виконання умови (6.1) необхідне для забезпечення гарантованого електропостачання.

На сьогоднішній день, у СНЕЕ використовуються різні види акумуляторних батарей. Для коректного проектування інтелектуальної логіки управління необхідно враховувати максимальну глибину розряду (Depth of Discharge – DoD) акумуляторів, де сучасні технології можуть дозволити забезпечити до 80% від їх номінальної ємності:

$$C_{CHЭЭ} \geq 0,2 \cdot C_{CHЭЭ}^{ном.}, \quad (6.2)$$

де  $C_{CHЭЭ}$  – ємність системи накопичення електричної енергії (залишкова);  $C_{CHЭЭном}$  – номінальна ємність системи накопичення електричної енергії.

Для ефективної та надійної роботи в режимах заряду/розряду СНЕЕ, а також відстеження залишкової ємності необхідно передбачити канали системи сенсорів для центрального контролера. Максимізація енергетичної ефективності автономної ФДЕС на центрального контролера також має враховувати такі додаткові функції:

1. Забезпечити завантаження ДГ у бажаних режимах лише на рівні 30-70% від його встановленої потужності;
2. Не допускати небажаних частих включень/відключень ДГУ, особливо в режимах роботи на малих навантаженнях;
3. Для СФЕС проводиться розрахунок максимальної потужності, яку можна «зняти» в умовах за ТМП-технології. Відповідне значення подається у свій DC/DC перетворювач СФЕС.

Враховуючи вище викладене, було зроблено висновок про те, що характер змінної потужності навантаження і рівня інсоляції обумовлює для ефективної роботи системи, що має у своєму складі СНЕЕ, оптимізаційні підходи до визначення коректного комплектного складу останніх. Поняття «статичний режим» для подібних систем ґрунтується на квазістатичному врахуванні їхнього попереднього стану заряду. Виконання зазначених умов забезпечить максимальне заміщення енергії, що виробляється ДГУ, енергією зв'язки СФЕС-СНЕЕ, а отже, і максимальну економію дорогого дизельного палива. Виконання цих умов досягається раціональним вибором встановлених потужностей СФЕС та СНЕЕ із врахуванням наявного потенціалу ВДЕ та характеру навантаження.

Алгоритм узгодженої роботи різнотипних установок ВДЕ приведений на рисунку 6.1.

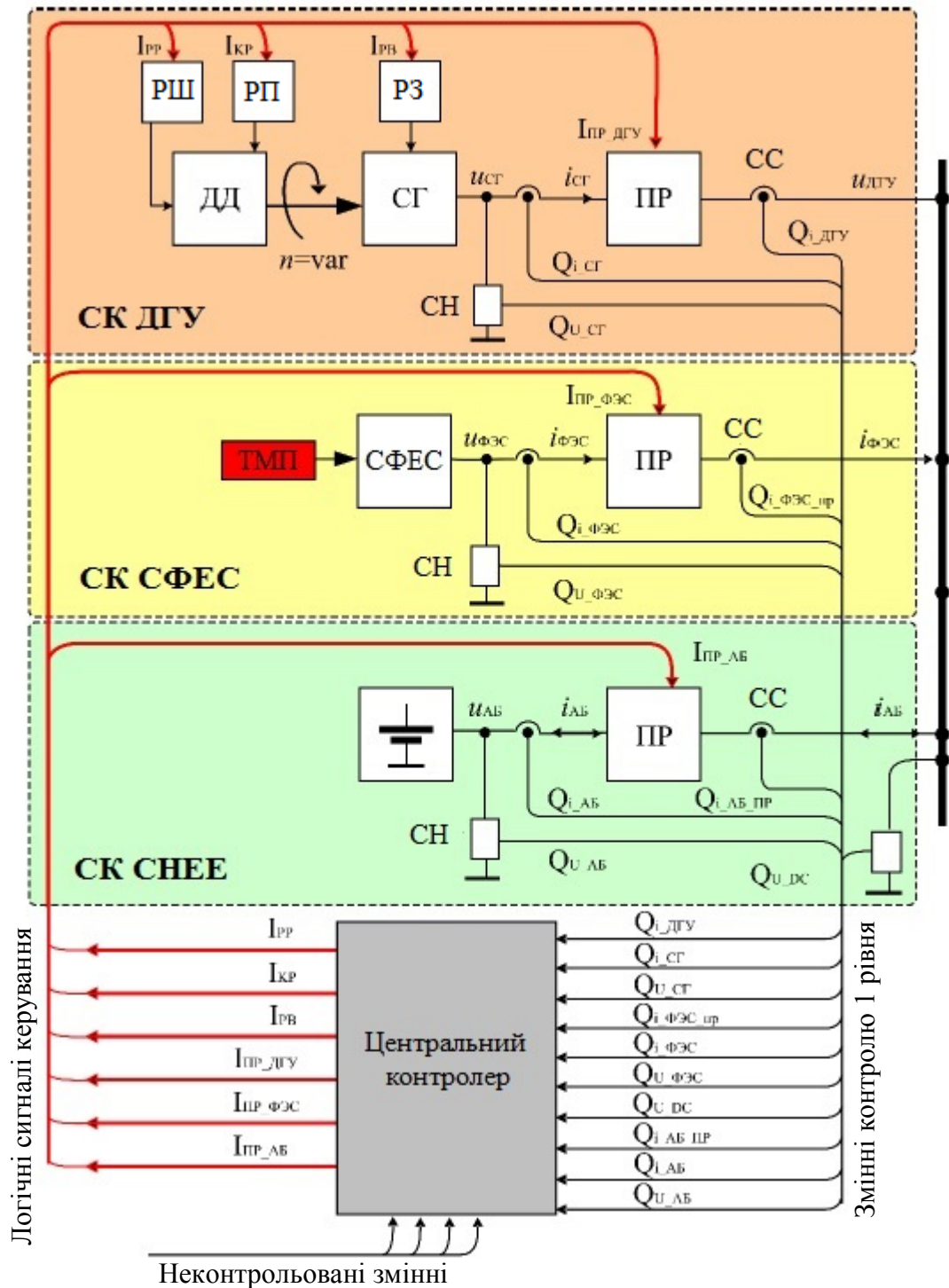


Рисунок 6.1 – Алгоритм узгодженої роботи різнотипних установок ВДЕ

На рисунку 6.1 у спрощеній конфігурації представлена СК ФДЕС, що включає системи керування (СК) первинного рівня кожного джерела, які реалізує «оперативний» алгоритм управління. Так, за поточним значенням напруги та струму СНЕЕ, що знімаються з відповідних сенсорів напруги (СН) і сенсора струму (СС), в СК СНЕЕ проводиться розрахунок залишкової

ємності накопичувача за показником SOC. Якщо SOC перевищує 95% від повної ємності СНЕЕ, СК формує керуючий сигнал на зупинку ДГУ, де електричні сигнали подаються на спеціальні релейні пристрої: РШ – регулятор швидкості обертання ДГ, КП – регулятор положення ТНВД, РЗ – регулятор збудження СГ. Окрім зупинки ДГУ, формується сигнал-команда на переведення СНЕЕ в режим розряду через відповідний перетворювач (ПР). При зниженні SOC нижче 20% формується сигнал-команда на запуск ДГУ та переведення накопичувача в режим заряду від СФЕС. Відповідні сигнали управління подаються на перетворювач DC/DC, чим забезпечується його функціонування в режимі керованого джерела струму (СФЕС) при заряді та стабілізатора напруги при розряді (СНЕЕ). Даний алгоритм управління підвищує експлуатаційний ресурс ДДУ, оскільки скорочується кількість мотогодин його роботи в небажаних часових інтервалах графіка навантаження.

З точки зору ефективної роботи ДГУ логіка управління комплексом організована таким чином, що можлива робота дизеля в оптимальному вікні завантаження від 30 до 70% своєї встановленої потужності. Алгоритм враховує технічні дані генеруючих установок та поточні значення зовнішніх факторів (G, T для СФЕС). Так проводиться розрахунок максимальної потужності, яку можна «зняти» в умовах за ТМП-технології. Це значення подається у свій DC/DC перетворювач СФЕС, де формується електричний сигнал управління. Алгоритм роботи блоку ТМП не розглядається та не моделюється в рамках даного дослідження. Такий підхід управління забезпечує максимально корисне використання енергії, що генерується СФЕС-СНЕЕ, що підвищує ефективність всього енергетичного комплексу. Для практичної реалізації запропонованих алгоритмів управління необхідний постійний контроль за запасом енергії в накопичувачі та поточними значеннями сенсора витрати палива (ДП), число оборотів ДД (n), діючі значення випрямлених значень напруги та струму. Крім того, ДДУ має бути



виконана за третім ступенем автоматизації, що забезпечує дистанційний запуск та зупинення ДГ.

### **6.1 Висновок**

В результаті проведених досліджень розроблено стратегію ефективного енергоменеджменту фото-дизельної системи електропостачання. Система будується за модульним принципом з підключенням окремих генеруючих установок через індивідуальні силові перетворювачі. Енергетичний баланс із урахуванням надлишків енергії, що генерується від фотоелектричної станції, забезпечується за допомогою системи накопичення електроенергії. Запропоновано функціональний алгоритм взаємодії системи накопичення електричної енергії з дизель-генераторною установкою для автономних енергетичних комплексів, а також ефективні алгоритми керування їхніми робочими режимами із врахуванням оптимального завантаження ДДУ.

## **7 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В ППП MATLAB SIMULINK**

КАСЕП, побудовані з урахуванням традиційного енергоносія, і навіть ВДЕ, є досить складні гібридні енергокомплекси. Такі системи складаються з різних взаємопов'язаних неоднорідних за характеристиками енергетичних об'єктів, наприклад фотоелектричних модулів з нелінійним взаємозв'язком вихідної потужності від температури навколишнього середовища, стохастичним характером вироблення електроенергії, експлуатація ДДУ в небажаних межах за показником коефіцієнта завантаження та ін. палива, що інтенсифікує процеси карбонізації та негативно впливає на моторесурс дизельного двигуна (ДД). Основним технічним завданням, яке доводиться вирішувати при проектуванні таких систем, є узгодження вкрай непостійних у часі режимів виробництва, передачі, накопичення та споживання електроенергії. Бажання створити автономні електротехнічні комплекси, які б конкурували з централізованою системою електропостачання стимулює інженерів та дослідників вирішувати нетривіальне технічне завдання в умовах суворих обмежень - гарантоване забезпечення споживачів електроенергією необхідної якості при збільшенні вкладу «зелених» технологій у загальний енергетичний баланс, зниженні собівартості виробленої ефективного використання вуглеводневого енергоносія з мінімізацією його споживання. Проведений аналіз наукових досліджень, присвячених розробці та експлуатації систем електропостачання з використанням ВДЕ, показав, що вчені застосовують різноманітні підходи. Варто зазначити, що в опублікованих роботах, насамперед, оптимізуються склад та способи поєднання різнотипних енергетичних установок, пропонуються ефективні структурні та функціональні схеми побудови автономних енергетичних систем, удосконалюються системи регулювання, а також проектуються нові алгоритми управління [15-20]. Як технічний

«інструмент» використовуються відомі методи, що дозволяють досить успішно вирішувати оптимізаційні завдання.

Simulink – це середовище блок-схем для багатошарового моделювання та проектування. Simulink підтримує проектування на системному рівні, моделювання, автоматичну генерацію коду, а також безперервне тестування та перевірку вбудованих систем. Simulink надає графічний редактор, бібліотеки блоків, що настроюються, і вирішувачі для моделювання динамічних систем. Він інтегрований з MATLAB, що дозволяє включати алгоритми MATLAB у моделі та експортувати результати моделювання до MATLAB для подальшого аналізу.

Stateflow надає графічну мову, що включає діаграми переходів станів, блок-схеми, таблиці переходів станів та таблиці істинності. Пакет Stateflow використовується, щоб описати, як алгоритми MATLAB та моделі Simulink реагують на вхідні сигнали, події та часові умови. Stateflow дозволяє проектувати і розробляти диспетчерське управління, планування завдань, управління несправностями, протоколи зв'язку, інтерфейси користувача і гібридні системи. За допомогою Stateflow моделюється комбінаторна та послідовна логіка прийняття рішень, яку можна інтегрувати як блок моделі Simulink, так і виконати команду коду в MATLAB. Графічна анімація дозволяє аналізувати та налагоджувати логіку під час її виконання.

### **7.1 Моделювання режимів роботи дизель-генераторної установки**

Рисунок 7.1 (а) ілюструє змодельовану зовнішню гілку швидкісної характеристики ( $M$  і  $P$ ) з ТНВД, а також навантажувальну характеристику ДГУ. Рисунок 7.1 (б) ілюструє характеристику, за якою виконується розрахунок витрати дизельного палива. При малих навантаженнях  $P$  значно зростає питома витрата  $g$  дизельного палива вироблення 1 кВт·ч електричної енергії, що чітко видно на рисунку 7.1 (б). Варто зазначити, що тривала робота ДГУ на навантаження менше 30% від номінальної призводить до

закоксовування циліндрів двигуна через фракції палива, що не встигли згоріти в них, що негативно позначається на моторесурсі, а також більшій кількості шкідливих викидів в навколишню атмосферу. З цієї причини, за умов експлуатації у складі ФДЕС, перспективно розглянути ДГУ випрямного типу. Для цього потрібні математичні моделі, що дозволяють за дійсними значеннями положень важеля подачі палива визначати поточну часткову швидкісну характеристику і момент дизеля, що обертає, по поточній кутовій частоті обертання валу.

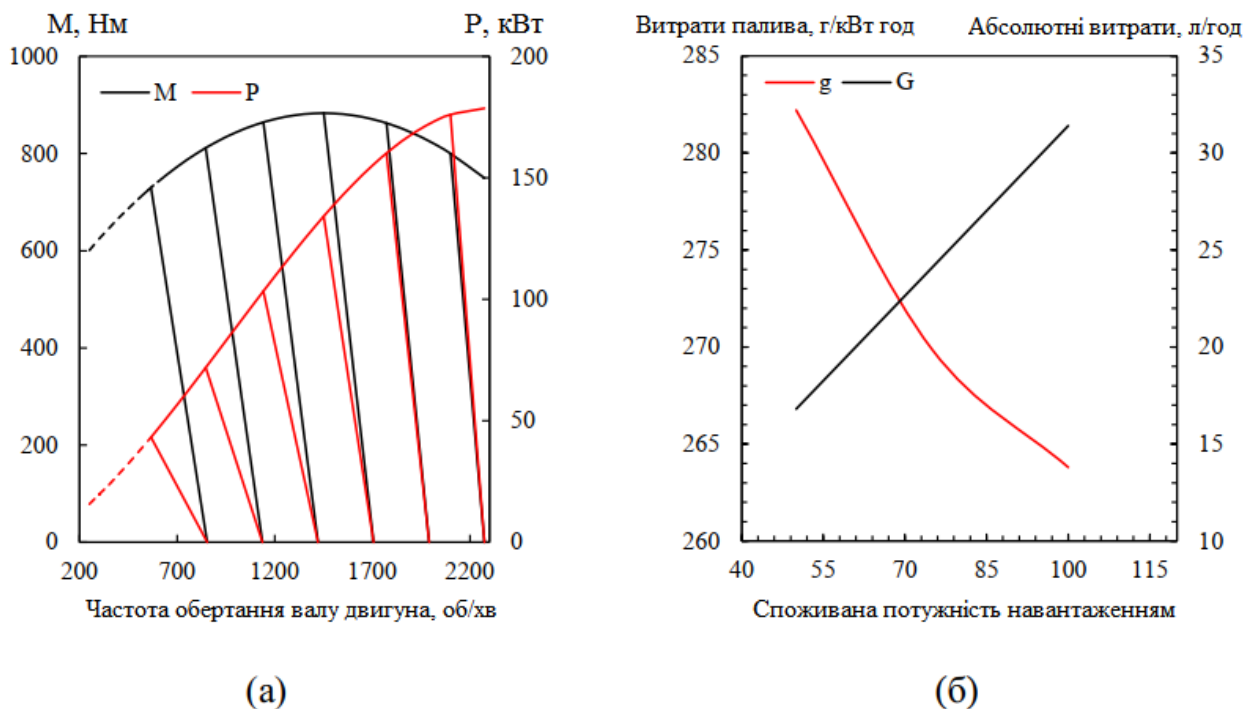


Рисунок 7.1 – Зовнішня швидкісна характеристика двигуна (а), навантажувальна характеристика дизель-генераторної установки (б) у MATLAB/Simulink

## 7.2 Моделювання фотоелектричної системи в MATLAB Simulink

Основним механізмом, що дозволяє фотоелементу генерувати електрику, є фотогальванічний ефект. Фотогальванічний ефект – це напруга, коли світло падає на матеріал. Фотоелемент являє собою напівпровідниковий фотоелектричний перетворювач, що складається з р-п переходу на якому виникає електрорушійна сила, що забезпечує електричний струм у

зовнішньому ланцюгу. Детальні математичні інтерпретації цього процесу добре описані у роботах [19, 20].

Вхідними даними є інтенсивність сонячного випромінювання  $G$ , і навіть температура навколишнього середовища  $T$ .

Модель підсистеми СФЕС представлена малюнку 7.2. Масив сонячних панелей, що входять до складу субсистеми СФЕС, може передавати струм, що генерується, безпосередньо в СНЕЕ або ж в мережу залежно від режиму роботи установки. Вплив сонячного контролера враховується як пропорційне зниження коефіцієнта корисної дії.

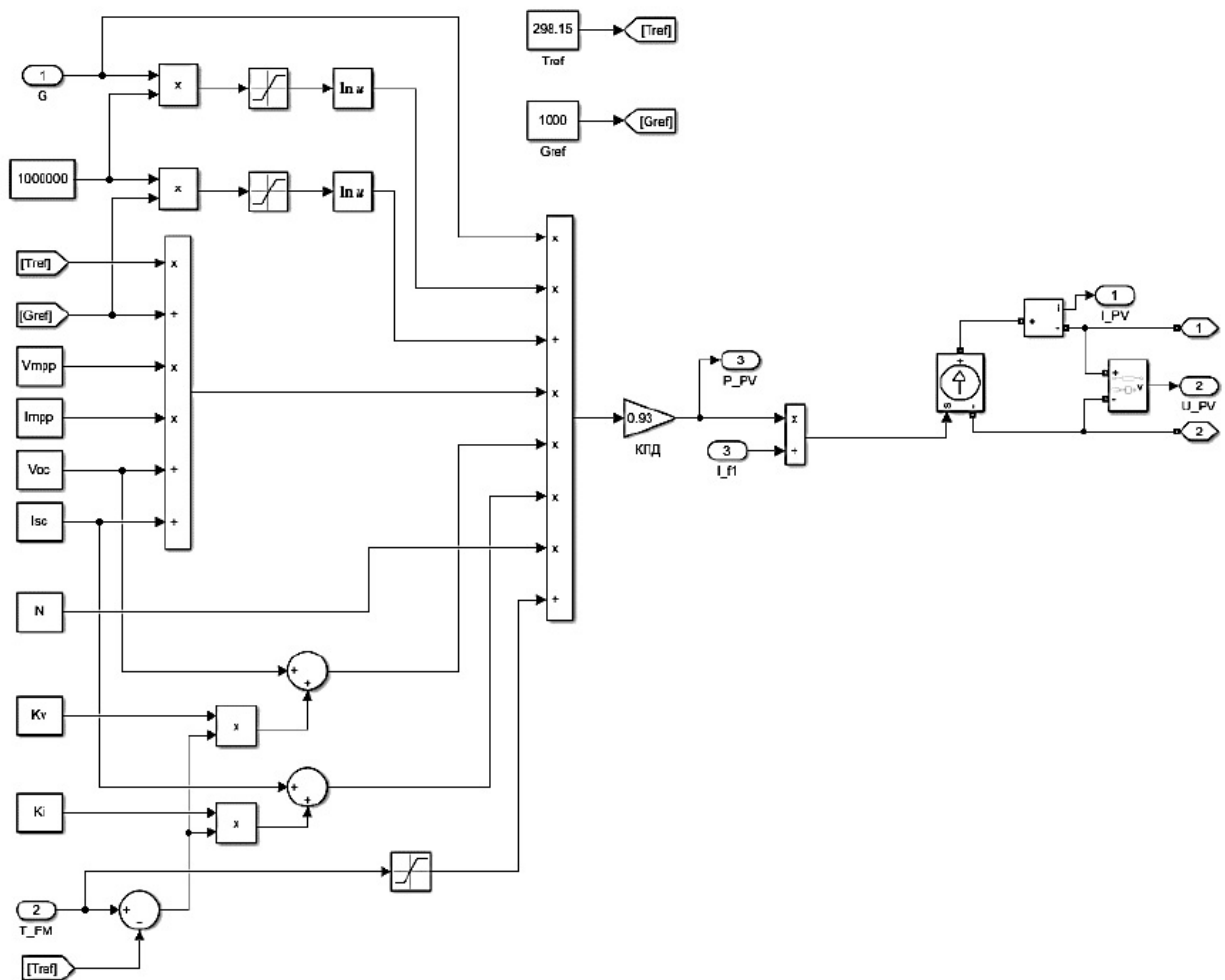


Рисунок 7.2 – Модель підсистеми фотоелектричної системи в MATLAB Simulink

Для побудови моделі СФЕС використовувалася методика, запропонована [20], за якою максимальна вихідна потужність СФЕС

визначається за виразом де  $N$  – кількість фотоелектричних панелей у масиві;  $C_F$  – постійний коефіцієнт;  $G$  – поточний рівень інсоляції;  $T_{ФЕС}$  – поточна температура фотоелектричного модуля;  $\eta_{пероб.}$  – ефективність перетворювача з контролером ТМП.

Енергетичні характеристики фотоелектричного модуля, одержані з використанням математичної моделі, наведені на рисунку 7.3.

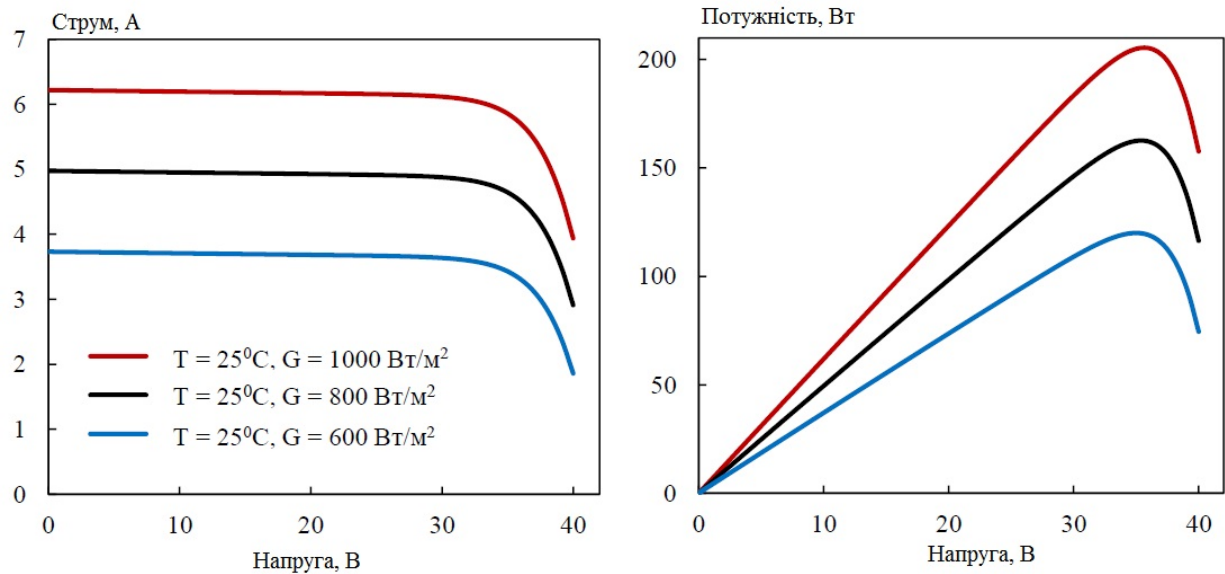


Рисунок 7.3 – Вольт-амперні характеристики фотоелектричного модуля

(а) та потужнісні характеристики

(б) при різній інсоляції, отримані в MATLAB/Simulink

Результати моделювання показали, що розроблена модель імітує поточні характеристики СФЕС із задовільною точністю. Максимальна похибка розрахункових значень вихідної потужності у всьому діапазоні можливих змін температури та інсоляції не перевищує 4%. Також варто додати, що в енергетичній характеристиці панелі збільшення температури на  $1^\circ\text{C}$  призводить до зниження потужності, що виробляється, на 0,45%.



### 7.3 Моделювання системи накопичення електричної енергії у MATLAB Simulink

СННН застосовуються в автономних системах електропостачання з метою забезпечення балансу між часом виробництва електроенергії та часом її споживання. Акумулятор заряджається днем при надлишку генерованої потужності від ВДЕ і розряджається у вечірній час, коли вхідна потужність нижче за необхідне навантаження з урахуванням втрат. Існує кілька технологій накопичення енергії, сумісних із електричними системами.

Сьогодні в автономних системах використовується велика кількість типів акумуляторів, що мають свої переваги, а також недоліки. Автор пропонує розглянути два типи технологій накопичення, які стали часто використовуватися у ФЕС: літій-залізофосфатні акумулятори (LiFePO<sub>4</sub>, LFP) та панцирний підклас акумуляторів (OPzS). Дані технології задовольняють вимоги СФЕС: велика циклічність (кількість заряду/розряду, що витримуються), малий саморозряд, широкий діапазон робочих температур, мінімальне обслуговування, а також можливість глибокого розряду (до 80%). Такі технології мають значний ресурс при циклічному режимі роботи влітку, а також добрий потенціал для переважно буферного режиму роботи взимку.

Найчастіше акумулятори моделюються як ідеальні джерела напруги. Це розумний підхід за умов короткочасного низького навантаження, проте насправді акумулятори виявляють нелінійність характеристик. Характеристики залежать насамперед від температури та хімічного стану електроліту. Хімічні речовини в акумуляторі постійно реагують, тому їх властивості завжди змінюються на рівні. Хоча концептуально проста модель ідеального джерела напруги неадекватна, через складну внутрішню поведінку, акумулятори часто розглядаються як «чорні ящики», без урахування механізмів, що визначають їх нелінійні характеристики. Для більшості практичних застосувань використання «чорної скриньки» може

бути виправдане, якщо характеристики, що цікавлять, – напруга і стан заряду акумулятора (SOC).

У MATLAB Simulink CHEE моделюється за допомогою керованого джерела напруги, послідовно включеного з постійним опором (рисунок 7.4). Модель виконана у вигляді окремої підсистеми з можливістю введення основних параметрів через діалогове вікно, що дозволяє її модифікувати і використовувати для дослідження характеристик акумуляторів різних типів.

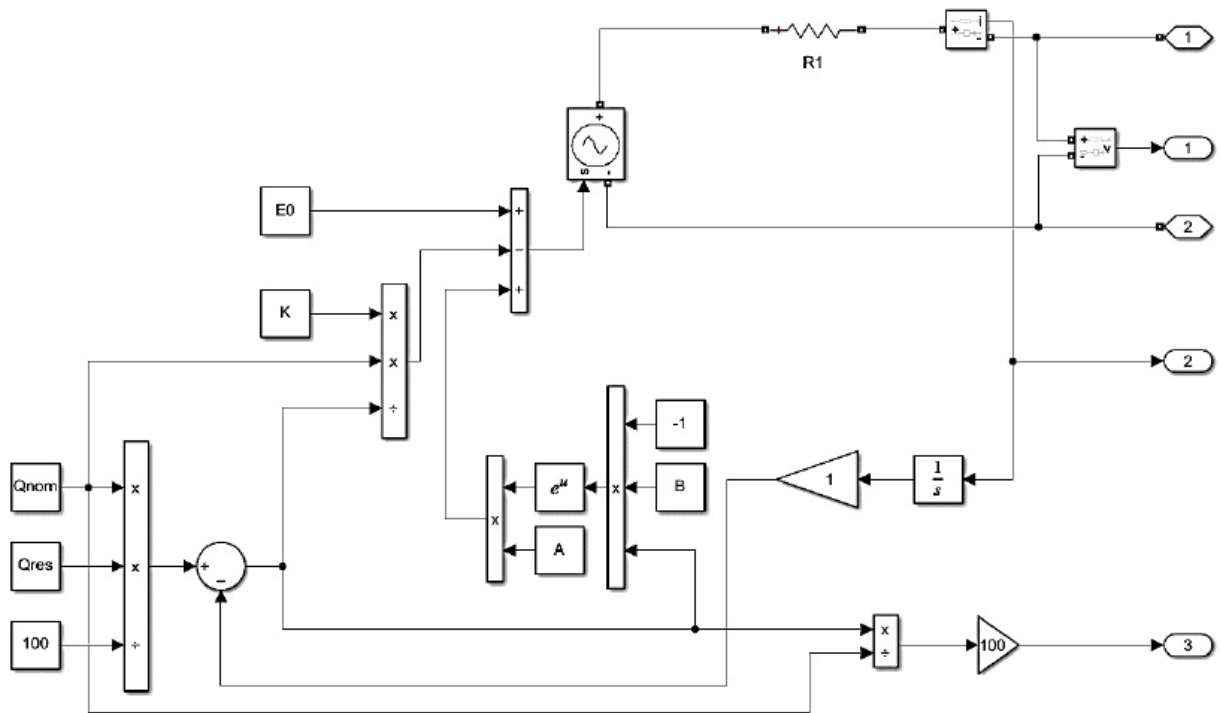


Рисунок 7.4 – Підсистема накопичення електричної енергії в MATLAB Simulink

Результати моделювання розрядної характеристики LFP-акумулятора наведено на малюнку 7.5.

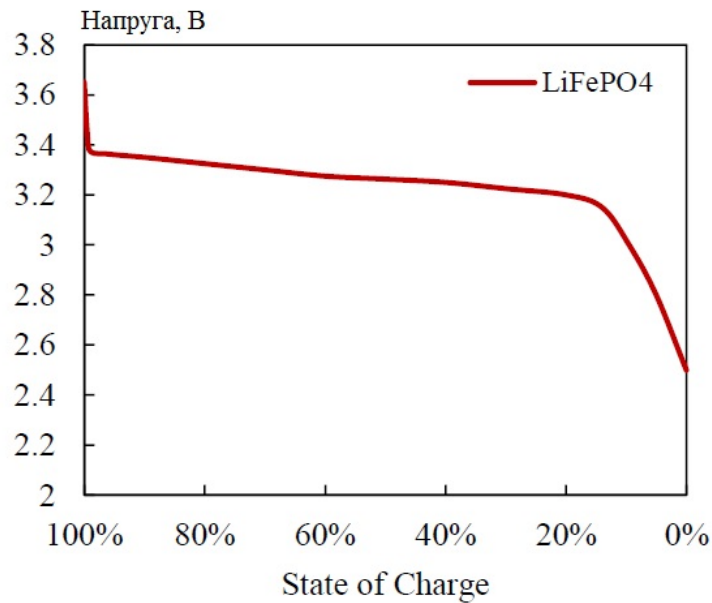


Рисунок 7.5 – Розрядна характеристика одиничного акумулятора в MATLAB Simulink

Основне призначення СНЕЕ у автономній системі – забезпечення безперебійності електропостачання споживача. Крім того, модель забезпечує узгодження графіків споживання та генерації за рахунок додаткового запасу електроенергії в автономному електротехнічному комплексі. Однак, для реалізації цих можливостей потрібне інтелектуальне управління джерелами електричної енергії в системі. Аналіз показує, що модель може працювати з достатньою точністю. Максимальна похибка напруги за умов зміни вхідних величин щодо паспортних даних становить  $\pm 2\%$ .

#### 7.4 Моделювання споживача електричної енергії в ППП MATLAB Simulink

Для моделювання різних типів споживачів децентралізованих об'єктів показники електроспоживання визначаються відповідно до нормативних типових графіків реальних електричних навантажень. Дані цих графіків були отримані в ході статистичних спостережень за період від 5 до 10 років на підставі. Модель децентралізованого споживача представлена малюнку 7.6. Основою моделі електричного навантаження служив блок Signal Builder, у якому типові графіки сезонного активного навантаження сільських житлових

будинків вводилися до блоку через заздалегідь прописаний цикл синтаксису MATLAB – for.

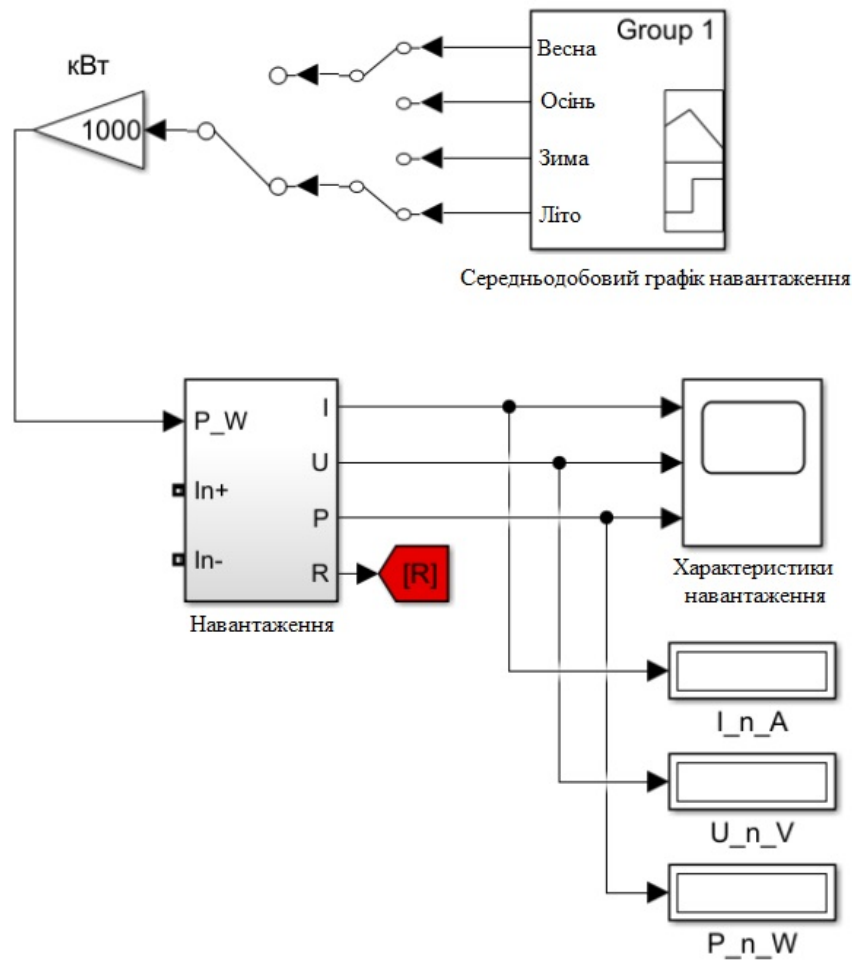


Рисунок 7.6 – Зовнішній вигляд моделі децентралізованого споживача в MATLAB/Simulink

Електрична частина моделі навантаження побудована з урахуванням керованого джерела струму, де вхідним параметром служила величина вихідної напруги інвертора. Для контролю вихідних параметрів: струм, напруга, а також активна потужність на висновках блоку споживача електроенергії передбачено відстеження через осцилограф.

## 7.5 Висновок

В результаті комп'ютерного моделювання запропоновано модель фотоелектричного модуля, що дозволяє отримати вольтамперну та потужну характеристику за даними його технічної специфікації, модель системи накопичення електричної енергії з можливістю введення технічних параметрів через діалогове вікно, що дозволяє легко її модифікувати та використовувати для дослідження характеристики акумуляторів різних типів. а також для побудови моделей фотоелектричних систем довільної конфігурації на їх основі; модель автономного споживача електроенергії та методика аналізу режимів електроспоживання автономними енергетичними системами.

## 8 ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ КОМБІНОВАНОЇ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ

Існує кілька підходів, що використовуються для досягнення оптимальної конфігурації комбінованих електростанцій. Серед них відомий науково-технічний підхід, який визначається ймовірністю дефіциту електропостачання. Загальний виробіток електроенергії  $E_{\text{комб.ЕС}}$  визначається наступним виразом:

$$E_{\text{комб.ЕС}}(t) = E_{\text{ФЕС}}(t) + E_{\text{ДГУ}}(t) \quad (8.1)$$

Для коректного тестування розробленої структури, в якій перевіряється здатність оптимально керувати режимами ФДЕС, необхідно провести раціональний вибір та налаштування параметрів основних енергетичних компонентів системи: ДДУ, СФЕС та СНЕЕ. Для цього використовуються математичні моделі автономних систем електропостачання, представлені в попередньому розділі роботи, а також прийнята до моделювання інтелектуальна архітектура управління електротехнічного комплексу автономного електропостачання. Комплексна імітаційна модель ФДЕС, яка використовувалася для проведення обчислювальних експериментів, приведена на рисунку 8.1.

Модель містить субсистеми всіх основних компонентів комплексу: дизель-генератор, модель фотоелектричної станції та системи накопичення електричної енергії на основі акумуляторних батарей. Усі генеруючі установки підключені через відповідні напівпровідникові перетворювачі. Слід зазначити, що параметри компонентів моделі відповідають параметрам прийнятих до моделювання джерел, що дозволяє з одного боку контролювати адекватність одержаних результатів, з іншого – спростити вибір та налаштування параметрів.

На основі керуючих команд з дотриманням енергетичного балансу центральний контролер з бібліотеки Stateflow керує режимами роботи DC/DC





Приклад характеристики продуктивності системи за умови максимального внеску відновлюваного джерела енергії в літній час приведений на рисунку 8.2.

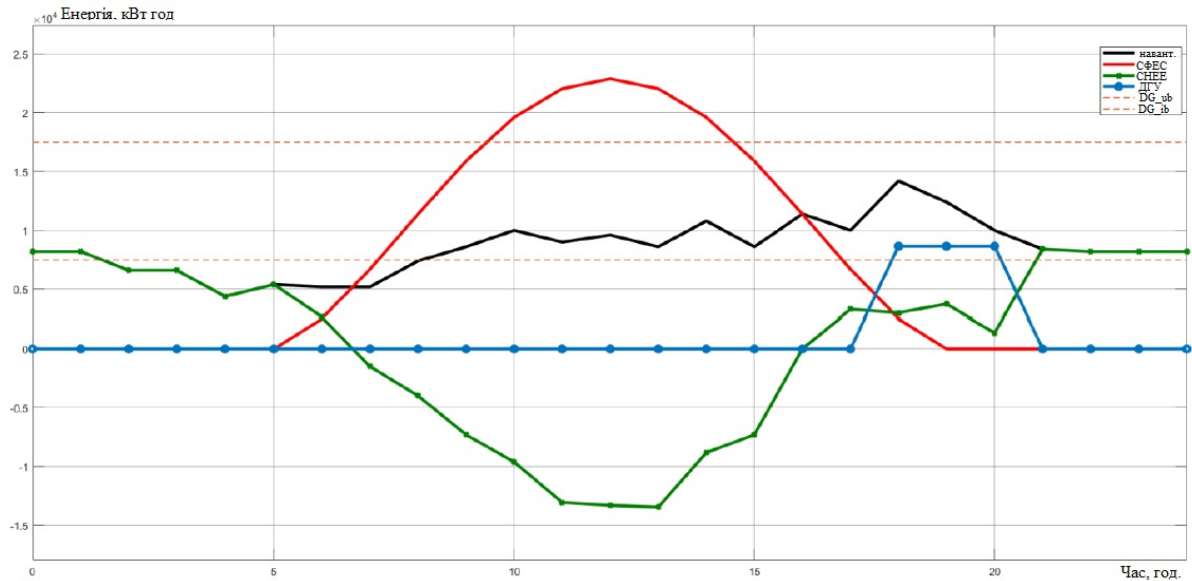


Рисунок 8.2 – Діаграма енергетичного балансу в умовах літнього навантаження

Приклад характеристики продуктивності системи за умови максимального внеску відновлюваного джерела енергії в зимній час приведений на рисунку 8.2.

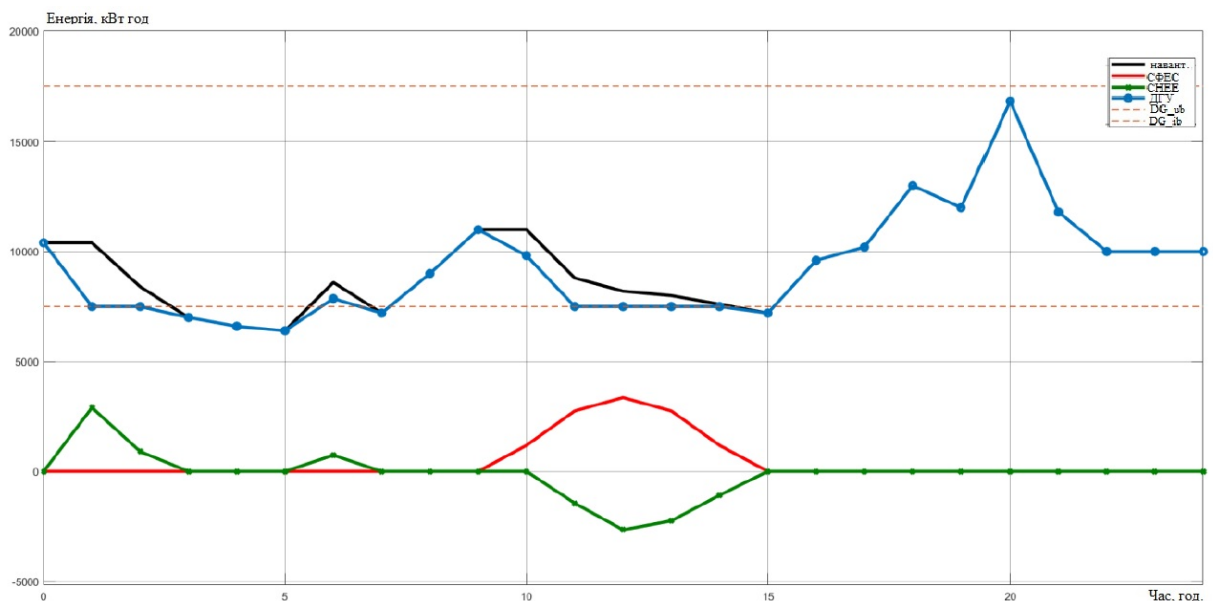


Рисунок 8.3 – Діаграма енергетичного балансу в умовах зимнього навантаження

За відсутності енергії СФЕС обмінна енергія розряду СНЕЕ слідує за зміною рівня електроспоживання. Коли виробництво електроенергії від СФЕС починає збільшуватися, СНЕЕ починає працювати спільно з ФЕС, що видно о 06:00 і з 16:00 до 18:00. Залишкова ємність СНЕЕ початку доби прийнята рівної 60% для моделювання недостатньої кількості інсоляції з погляду попереднього дня. За час моделювання рівень заряду СНЕЕ зменшується до 20%. Під час заряду СНЕЕ залишкова ємність збільшується з 20 до 94%, максимальний струм заряду не перевищує 22 А, що менше допустимого струму 30 А для масиву моноблоків. За час роботи в зонах розряду рівень SOC СНЕЕ зменшується до 60%, що відповідає спочатку заданому, і свідчить про те, що енергія, витрачена СНЕЕ харчування навантажень споживача, встигає повністю заповнитися за добу.

Для наочної демонстрації керуючої логіки ФДЕС було використано надбудову Stateflow в MATLAB Simulink. Найкраще цю надбудову використовувати для імітації та моделювання систем, керованих подіями. Stateflow добре підходить для аналізу сценаріїв подій в системі, в якій кілька підсистем реагують на події, що відбуваються в їхньому оточенні одночасно, залишаючись в курсі операцій один одного. Надбудова є графічним редактором, в якому об'єкти переносяться з палітри проектування. Крім того, Stateflow спрощує моделювання системи та підтримує більш складну логіку шляхом додавання рівнів ієрархії, паралелей, нових подій, дій, історії, таблиць істинності та ін. Ці важливі розширення та гнучкий синтаксис підвищують привабливість Stateflow для моделювання поведінки складної системи. Зручність графічного інтерфейсу та однорідність середовища моделювання є переконливою перевагою для розробника архітектури управління з погляду послідовності, правильності та повноти поведінки системи. Обмеження та умови СК можуть бути змодельовані в Stateflow, де стани являють собою різні режими роботи для ФДЕС. На рисунку 8.4 показано діаграму Stateflow для роботи ФДЕС.



перевірка виконання умови відсутності наявності логічних команд із масиву прогнозних даних  $array\_logic\_DG==0$  на аналізованому кроці генерація електроенергії від ФЕС ( $P_{pv}>1$ ).

Далі, за другим пріоритетом перевіряється умова наявності генерації електроенергії від СФЕС, що перевищує навантаження на кроці, що розглядається ( $P_{pv} > Load$ ) і одночасне виконання умови  $SOC_c > SOC_{lb}$ . Всередині стану за допомогою команди `entry` відбувається одномоментне відключення ДГУ ( $DG=0$ ), включення СФЕС ( $PV=1$ ). Далі перевіряється ряд логічних команд: якщо  $SOC_c \leq SOC_{lb}$ , то СНЕС не працює в режимі розряду ( $ESS\_disch=0$ ); якщо  $P_{pv} < Load$ , то СНЕС працює у режимі розряду ( $ESS\_disch=1$ ). Друга логічна умова: якщо  $P_{pv} > Load$ , то СНЕС працює у режимі заряду ( $ESS\_ch=1, ESS\_disch=0$ ); невиконання умови відключатиме режим заряду СНЕС –  $ESS\_ch=0$ . Даний режим може тривати протягом тривалого проміжку часу до моменту зміни вхідних прогнозних даних, тому за допомогою команди `during` відбувається дублювання описаних операцій з отриманням масиву прогнозних даних щодо наявності надлишку електроенергії для накопичення в СНЕС ( $ESS\_disch=extraDisch$ ).

## 9 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 9.1 Загальні положення

У цьому розділі магістерської дипломної роботи розробляються заходи з охорони праці в процесі підвищення ефективності комбінованих автономних систем електропостачання на базі електроустановок з відновлюваними джерелами енергії. Аварії машин і механізмів, які використовуються на заводі, а також невиконання правил по безпечній їх експлуатації може призвести до серйозної загрози життю та здоров'ю технологічного персоналу через небезпеку професійних захворювань і травмувань під час будівництва.

Відповідно до ГОСТ 12.003-74, на оперативно-ремонтний електротехнічний персонал, який здійснює обслуговування систем електропривода шахтних механізмів, впливають наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори [21]:

Фізичні: рухомі машини і механізми; вироби, заготовки, матеріали, що пересуваються; незахищені рухомі елементи виробничого обладнання; підвищена та понижена температура повітря робочої зони; підвищена та понижена рухливість повітря; підвищена та понижена вологість повітря; підвищена температура поверхонь обладнання, матеріалів; підвищена запыленість повітря робочої зони; недостатня освітленість робочої зони; недостатність природного освітлення; небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання якого може відбутися через тіло людини; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищений рівень вібрації; розташування робочого місця на значній висоті відносно поверхні землі (підлоги); гострі кромки, задирки та шорсткість на поверхнях заготовок, інструментів та обладнання.

Психофізіологічні: фізичні перевантаження (динамічні); нервово-психічні перевантаження (монотонність праці, емоційні перевантаження, перенапруга аналізаторів). [21].

## 9.2 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

### 9.2.1 Технічні рішення з безпечної організації робочого місця

Живлення силового обладнання заводу та системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Категорія умов по небезпеці електротравматизму – особливо небезпечні, так як виконуються назовні.

Все силове обладнання заводу повинно відповідати вимогам нормативних документів і на них повинна бути експлуатаційна документація, а крани та інші машини, що придбані за кордоном – повинні мати сертифікат відповідності вимогам безпеки праці. Забороняється експлуатація засобів механізації без передбачених їх конструкцією огорож, блокувань, систем сигналізації та інших засобів колективного захисту працюючих. До управління і обслуговування машин і механізмів допускаються особи (працівники), що отримали відповідну професійно-технічну підготовку, пройшли навчання і перевірку знань із безпеки праці.

Персонал, який експлуатує засоби механізації, оснащення, пристрої та ручні машини, до початку робіт повинен бути навчений безпечним методам та способам робіт відповідно до інструкцій заводу-виробника та інструкції з охорони праці. Робочі місця, засоби підмоцнування (риштовання, помости, робочі площадки тощо, які забезпечують безпеку виконання робіт на висоті) повинні відповідати вимогам цього розділу, розділу 6 цих норм, ГОСТ 24258, ГОСТ 26887, ГОСТ 27321, ГОСТ 28012. Під час виконання будівельно-монтажних робіт необхідно застосовувати переважно інвентарні засоби підмоцнування.

Робочі навантаження на риштовання в процесі виконання робіт не повинні перевищувати визначених технічною документацією. За необхідності передавання на риштовання додаткових навантажень (від підйомників, вантажопідіймальних площадок тощо) їх конструкцію необхідно перевірити на ці навантаження. У місцях піднімання людей на риштовання повинні бути вивішені плакати, на яких зазначено схеми навантажень, їх величини, а також схеми евакуації працівників на випадок аварійних ситуацій.



Під час роботи на конструкціях, під якими розташовані струмовідні частини, що перебувають під напругою, ремонтні пристосування і інструмент прив'язуються для запобігання їх падінню. Застосовувати в цих випадках монтерські запобіжні паски зі стропами з металевого ланцюга забороняється [21].

Подавати деталі на конструкції чи устаткування слід за допомогою «нескінченного» канату. Працівник, який стоїть внизу, повинен утримувати канат для запобігання його розгойдуванню і наближенню до струмопровідних частин. Працівники, які виконують роботи на висоті або верхолазні роботи, повинні бути в спецодязі, що не заважає рухам. Особистий інструмент слід зберігати в сумці.

Засоби підмоцнування повинні бути зроблені з рівних робочих настилів із зазором між дошками не більше ніж 5 мм, а у разі розміщення настилу на висоті 1,3 м та вище встановлювати огорожі з суцільною бортовою обшивкою по низу. Висота огорожі повинна бути не менше ніж 1,1 м, бортові обшивки - не менше ніж 0,15 м, відстань між горизонтальними елементами огорожі - не більше ніж 0,5 м.

Засоби підмоцнування, які використовуються під час робіт у місцях, під якими здійснюються інші роботи або є прохід, необхідно виконувати настилами без зазорів. Риштування та помості висотою до 4 м допускаються в експлуатацію після їх приймання керівником робіт та реєстрації в журналі робіт, а вище ніж 4 м – після приймання комісією, призначеною особою, яка відповідає за забезпечення охорони праці в організації, та оформлення відповідного акту.

Під час приймання риштувань та підмостей повинні бути перевірені: наявність кріплень, що забезпечують їх стійкість, вузли кріплення окремих елементів, робочі настили та огороження, вертикальність стояків, надійність опорних площадок та заземлення (для металевих риштувань).

Під час виконання робіт із риштувань висотою понад 6 м і більше повинно бути улаштовано не менше ніж два настили: робочий (верхній) і захисний (нижній); кожне робоче місце на риштуваннях, що прилягає до будинку чи споруди, повинно бути захищене зверху настилом, розташованим на висоті не вище ніж 2 м від робочого настилу. Якщо під час виконання

робіт рух людей чи транспорту під риштованнями і поблизу від них не передбачається, улаштування захисного (нижнього) настилу не обов'язкове.

Експлуатація ручного електроінструменту дозволяється у разі дотримання таких вимог [21]:

- перед кожною видачею інструменту в роботу повинна бути перевірена його комплектність та надійність кріплення деталей, справність захисного кожуху, кабелю (рукава);

- перед початком роботи повинна бути перевірена справність вимикача та машини на холостому ходу;

- під час перерв у роботі, після закінчення роботи, під час змащування, очищення, заміни робочого елемента інструменту ручні машини необхідно вимкнути та від'єднати від електричної мережі;

- ручні машини, маса яких із розрахунку на руки працюючого, перевищує 10 кг, повинні мати пристрій для підвішування;

- під час роботи з ручними машинами на висоті необхідно використовувати засоби підмоцвання (помости);

- нагляд за експлуатацією ручних машин необхідно доручати спеціально призначеній для цього особі. [20].

### 9.2.2 Електробезпека

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам [22]:

- 1) Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно: розміщувати неізолювані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

- 2) При живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі;

- 3) Електрозахисні засоби захисту

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізолюваними ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки [22].

### **9.3 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії**

#### **9.3.1 Мікроклімат**

Мікроклімат приміщення – це сукупність фізичних параметрів повітря в виробничому приміщенні, які діють на людину в процесі праці на її робочому місці, в робочій зоні.

Нормуються параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях та гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони. Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт). Параметри мікроклімату в виробничому приміщенні, де встановлена лінія, наведено в таблиці 7.1.

Таблиця 9.1 – Нормування параметрів мікроклімату на непостійних робочих місцях

| Період року | Категорія робіт | Температура, °С | Відносна вологість | Швидкість руху |
|-------------|-----------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Теплий      | Пб              | 15-29           | 70 при 25°С        | 0,2-0,5        |
| Холодний    | Пб              | 13-23           | не більш 75        | не більш 0,4   |

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату на робочому місці технологічного персоналу передбачається:

- в холодну пору року використання калорифера;
- в літню пору застосування вентиляторів обдуву;
- провітрювання приміщення.

### 9.3.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази, їх ГДК наведено в таблиці 9.2 [21].

Таблиця 9.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони оператора лінії

| Назва речовини     | ГДК, мг/м <sup>3</sup> |                 | Клас небезпечності |
|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------|
|                    | Максимально разова     | Середньо добова |                    |
| Вуглецю оксид (СО) | 20                     | 1               | 4                  |
| Пил нетоксичний    | 0,5                    | 0,15            | 4                  |

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено:

- провітрювання приміщення;

- цілісність вікон для перешкоджання попадання пилу в приміщення під час роботи лінії;
- встановлення пиловловлюючих засобів.

### 9.3.3 Виробниче освітлення

Природне освітлення.

В залежності від джерела світла промислове освітлення поділяється на:

- природне освітлення – освітленість приміщень світлом неба (прямого або відображеного), яке проникає через світлові пройми в зовнішніх огорожених конструкціях. По своєму спектральному складу воно є найбільш сприятливим. Природне освітлення характеризується коефіцієнтом природної освітленості КПО ( $e_n$ ). КПО – відношення природного освітлення, яке створюється в деякій точці заданої площини всередині приміщення світлом неба, до значення зовнішньої горизонтальної освітленості.

Основною величиною для розрахунку і нормування природного освітлення є коефіцієнт природної освітленості (КПО). Прийняте роздільне нормування КЕО для бічного і верхнього освітлення. Ті місця, що освітлюється тільки бічним світлом, нормується мінімальне значення КЕО в межах робочої зони, що повинно бути забезпечене в точках, найбільше віддалених від вікна.

Штучне освітлення.

Штучне освітлення використовується двох систем: загальне або комбіноване. Загальне освітлення – освітлення, при якому світильники розміщуються у верхній зоні приміщення рівномірно або пристосувальне до розташування обладнання. Комбіноване освітлення - додаткове освітлення, при якому до загального освітлення додається ще й місцеве. Місьцеве освітлення – освітлення, яке створюється світильниками, які концентрують світловий потік безпосередньо на робочих місцях.

Характеристика зорових робіт – малої точності.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «г».

Таблиця 9.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

| Х-ка зорової роботи | Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм | Розряд зорової роботи | Під-розряд зорової роботи | Контраст об'єкта з фоном | Х-ка фону                | Штучне при системі комбінованого освітлення |                        | Природне Ен пр | Сумісне Е сум |
|---------------------|--|-----------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|---|------------------------|----------------|---------------|
|                     |  |                       |                           |                          |                          | всього                                      | у т. ч. від загального |                |               |
| Малої точності      | Від 1,0 до 5 включно                                       | V                     | г                         | середній великий великий | світлий світлий середній | -   | 200                    | 3              | 1,8           |

Для загального освітлення приміщень рекомендується використовувати головним чином, світлодіодні лампи, що обумовлюється наступними перевагами: високою світловою віддачею (до 75 лм/Вт і більше); довгим часом використання (до 10000 годин); малою яскравістю поверхні, що світиться; спектральним складом випромінюючого світла (для деяких видів ламп цей склад є близьким до природного світла, що забезпечує гарну передачу кольорів). Разом з тим необхідно врахувати і недоліки цих ламп: висока пульсація світлого потоку та пов'язана з цим можливість стробоскопічного ефекту; для запалювання та горіння лампи необхідно включення послідовно з ним пускорегулюючих апаратів; працездатність ламп залежить від температури оточуючого середовища, до кінця часу роботи світловий потік зменшується більш ніж на половину від номінального [21, 22].

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

## 9.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум. Загальні вимоги безпеки» (таблиця 7.4).

Таблиця 9.4 – Рівень звукового тиску

| Характер робіт                                  | Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц |    |     |     |     |      |      |      |      |
|---|--|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
|   | 32   | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| Постійні робочі місця в промислових приміщеннях | 107  | 95 | 87  | 82  | 78  | 75   | 73   | 71   | 69   |

Шум порушує нормальну роботу шлунку, особливо впливає на центральну нервову систему. Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту - «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі;
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори [21-22].



## 9.5 Вібрація

Вібрація відноситься до факторів, які мають велику біологічну активність. Як загальна, так і локальна вібрація несприятливо впливає на організм людини, викликає зміну у функціональному стані вестибулярного апарату, центральної нервової, серцево-судинної систем, погіршує самопочуття та може призвести до розвитку професійних захворювань.

У нашому цеху присутня вібрація типу - За. Тобто технологічна вібрація діюча на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання.

Джерелами вібрацій в умовах, що розглядаються в проекті, являються сама лінія та вентилятори, які відносяться до типу загальної вібрації.

Основні параметри вібрації, такі як середньоквадратичне значення віброприскорення та віброшвидкості, логарифмічні рівні приведені у таблиці 10.6.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено:

- динамічне погашення вібрації - приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи;
- зміна конструктивних елементів машин;
- застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

Таблиця 9.6 – Середньоквадратичні значення

| Категорія вібрації по санітарним нормам | Напрямок дії                                     | Нормативні, корекційовані по частоті та еквівалентні корекційовані значення |     |                                     |    |
|---|--|---|-----|-------------------------------------|----|
|   |  | Віброприскорення  |     | Віброшвидкість                      |    |
|   |  | м·с <sup>-2</sup>   | ДБ  | м·с <sup>-2</sup> ·10 <sup>-2</sup> | ДБ |
| За                                      | Z <sub>o</sub> , Y <sub>o</sub> , X <sub>o</sub> | 0,1   | 100 | 0,2                                 | 92 |

## 9.6 Психофізіологічні фактори

Психофізіологічні фактори визначаються відповідно до Гігієнічної класифікації праці [21]. Робота монтажника будівельних конструкцій потребує великих фізичних зусиль за важкістю та напруженістю праці.

1. Клас умов праці за показниками важкості праці – допустимий (середньої важкості): загальні енергозатрати організму (ккал/м) – до 290; зовнішнє фізичне динамічне навантаження, виражене в одиницях механічної роботи за зміну, кг/(Вт): при регіональному навантаженні (для чоловіків) – 13000; при загальному навантаженні (за участю м'язів рук, тулуба, ніг) – до 44000; маса вантажу, що постійно підіймається та переміщується вручну, кг – до 30 кг; стереотипні робочі рухи: при локальному навантаженні (участь м'язів кистей та пальців рук) – до 40000; при регіональному навантаженні (участь рук та плечового суглоба) – до 20000; статичне навантаження (кг/с): двома руками (чоловіки) – до 70000; за участю м'язів тулуба та ніг – до 100 000; робоча поза: періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) та/або фіксованій позі (неможливість зміни взаєморозташування різних частин тіла відносно одна одної) до 25% часу зміни; перебування у вимушеній позі до 10%, в позі «стоячи» – до 60% часу зміни; нахил тулуба: вимушені нахили протягом зміни – 51-100 разів; переміщення у просторі (переходи через виконання технологічного процесу) – по горизонталі більше 8, вертикалі – 4 км.

### 9.6.2 Класи умов праці за показниками напруженості праці

Інтелектуальні навантаження: зміст роботи - рішення складних завдань з вибором за алгоритмом; сприймання інформації та їх оцінка – сприймання інформації з наступною корекцією дій та операцій; розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, контроль, перевірка завдання; характер виконуваної роботи – робота за встановленим графіком з можливим його коригуванням під час діяльності

Сенсорні навантаження: зосередження (%за зміну) - більше 75; щільність сигналів (звукові за 1 год) - більше 300; навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 20 до 25.

Емоційне навантаження: ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; ступінь ризику для власного життя – вірогідний; ступінь відповідальності за безпеку інших осіб – є відповідальним за безпеку інших.

Режим праці: тривалість робочого дня – 8 год; змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни) [21].

### **9.7 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи комбінованих автономних систем електропостачання на базі електроустановок з відновлюваними джерелами енергії в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій**

Всі системи електропостачання (СЕР) промислових об'єктів є досить вразливими до дії загрозливих чинників, що виникають у надзвичайних ситуаціях. Тому важливим питанням є забезпечення високої стійкості роботи СЕР. В даному випадку оцінка її стійкості може бути проведена за допомогою моделювання його ураження, що враховують можливі наслідки ураження людей, виникнення пожеж, виходу з ладу елементів енергетичних систем [21].

Дія радіації на матеріали залежить від виду випромінювання, дози, природи опроміненої речовини та від умов навколишнього середовища. В енергетичних системах використовують різні матеріали: метали, напівпровідники та різні органічні сполуки (діелектрики, смоли), найбільш чутливими до радіації є метали, бо в них велика концентрація вільних носіїв. Основними заходами підвищення радіаційної стійкості є: використання радіаційно-стійких елементів та матеріалів; застосування різних екранів, або активного захисту від дії радіації.

При взаємодії гама-випромінювань та деяким середовищем, цьому середовищу надається певна кількість енергії. Більша частина цієї енергії йде на поступальний рух електронів та іонів, що були утворені в процесі іонізації. Подальшу іонізацію викликають первинні електрони, що мають велику енергію. Як наслідок виникають тимчасові електричні та магнітні поля.

Виникнення електромагнітного імпульсу (ЕМІ), може викликати високі імпульси струму та напруги в кабельних лініях електропередачі, системи зв'язку, обчислювальних машин, антен радіостанцій тощо. В результаті імпульс струму чи напруги проникає в систему і спричиняє пошкодження, ступінь яких залежить від чутливості складових системи вузлів. ЕМІ може поширюватись на десятки кілометрів в навколишньому середовищі і по різних комунікаціях, здійснюючи вплив на об'єкти там, де ударна хвиля, світлове вимірювання і проникаюча радіація втрачають своє значення, як вражаючі фактори.

Результатом такого впливу може бути вихід із ладу різних пристроїв та спорядження. Особливо негативний вплив електромагнітного імпульсу на обладнання, яке не має спеціального захисту (вимикачі, різні «домішки» до системи проводів, електромагнітне екранування тощо).

Електромагнітний імпульс являє собою велику небезпеку для елементів СЕП, зокрема вимикачі та трансформатори, добре захищених від дії інших вражаючих факторів. Тому захист елементів від механічних пошкоджень не захищає від дії електромагнітного імпульсу. Саме тому, обов'язковим для обладнання СЕП є дослідження стійкості його роботи в умовах впливу електромагнітного імпульсу та іонізуючих випромінювань.

### 9.7.1 Дослідження стійкості роботи комбінованих автономних систем електропостачання на базі електроустановок з відновлюваними джерелами енергії в умовах дії іонізуючих випромінювань

Критерієм стійкості роботи енергетичного обладнання СЕП є граничне значення експозиційної дози ( $D_{гр}$ , Р), при якому в елементній базі можуть виникати зворотні зміни. Визначаємо граничні значення експозиційних доз для елементів СЕП. По мінімальному значенню  $D_{гр}$ , визначаємо границю стійкості системи в цілому. Так як трансформатори та вимикачі мають мінімальне значення  $D_{гр}$ , то далі для них розрахована Дослідження стійкості роботи при дії ІВ та ЕМІ, а кабельні лінії та повітряна лінія мають грозозахист, і стійкі до дії ЕМІ, то подальші розрахунки для них не виконуються. Результати заносимо у таблицю 7.7.

Розрахуємо можливу дозу для СЕП, граничний час експлуатації 10р.

$$D_{ем} = \frac{2 \cdot P_{I_{max}} \cdot (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{k_{осл}} = \frac{2 \cdot 4,92 \cdot (\sqrt{87660} - \sqrt{1})}{1} = 2903,53 \quad (P).$$

Таким чином система буде працювати стійко, так як, можлива експозиційна доза менша за граничну  $2903,53 < 100000$ .

Таблиця 7.7 – Граничні дози для елементів житлової забудови

| Елементи СЕП                                | $g_{рі}, P$ | $g_{р}, P$ |
|---|-------------|------------|
| Кабельні лінії ААБ (3x70 мм <sup>2</sup> )  | $0^8$       | $0^2$      |
| Кабельна лінії ААБ (3x120 мм <sup>2</sup> ) | $0^9$       |            |
| Трансформатори                              | $0^2$       |            |
| Вимикачі                                    | $0^4$       |            |

Визначаємо допустимий час роботи елементів СЕП за формулою:

$$t_{\text{дон}} = \left( \frac{D_{\text{зр}} \cdot K_{\text{осл}} + 2 \cdot p_{1\text{max}} \cdot \sqrt{t_p}}{2 \cdot p_{1\text{max}}} \right)^2$$

Отже,

$$t_{\text{донтр-р}} = \left( \frac{10^2 \cdot 1 + 2 \cdot 4,92 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 4,92} \right)^2 = 116,7 \cdot 10^2 \text{ год} = 13,3 \text{ (років)}$$

$$t_{\text{донвим}} = \left( \frac{10^4 \cdot 1 + 2 \cdot 4,92 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 4,92} \right)^2 = 9631 \cdot 10^4 \text{ год} = 10,9 \text{ (років)}$$

Отже, допустимий час роботи трансформаторів складатиме не менше 13 років, а вимикачів – близько 11 років.

### 9.7.2 Дослідження стійкості роботи системи електропостачання району житлової забудови в умовах дії електромагнітного імпульсу

Напряга наводки в горизонтальній і вертикальній струмопровідній частині:

$$U_{\Gamma} = E_{\text{в}} \cdot l_{\Gamma},$$

$$U_{\text{в}} = E_{\text{в}} \cdot l_{\text{в}},$$

де  $E_{\text{в}}$  – величина електромагнітного імпульсу (кВ/м);

$l_{\Gamma}$  – довжина горизонтальної струмопровідної частини системи (м),

$l_{\text{в}}$  – довжина вертикальної струмопровідної частини системи (м).

Розрахуємо  $U_{\Gamma}$  для трансформаторів та вимикачів:

$$U_{\Gamma\text{тр-р}} = 11,78 \cdot 1,48 \cdot 10^3 = 17460 \text{ (кВ/м)},$$

$$U_{\Gamma\text{вим}} = 11,78 \cdot 0,68 \cdot 10^3 = 8051 \text{ (кВ/м)}.$$

Допустиме коливання напруги живлення:

$$U_{\text{дон}} = U_{\text{ж}} + \frac{U_{\text{ж}}}{100} \cdot N,$$

де  $N$  – відсоток допуску,

$U_{жс}$  – напруга живлення;

$$U_{дон} = 10 + \frac{10}{100} \cdot (\pm 5) = 9,5 - 10,5 (\kappa B)$$

За критерієм стійкості роботи радіоелектронних систем, або окремих їх елементів в умовах дії електромагнітних випромінювань можна прийняти коефіцієнт безпеки, який для нормальної роботи механізму повинен бути рівним [22]:

$$K_{б} \geq 40 \text{ (дБ)}.$$

Визначаємо коефіцієнти горизонтальної і вертикальної безпеки:

$$K_{бгi} = 20 \cdot \lg(U_{\partial} / U_{ei}),$$

$$K_{бзi} = 20 \cdot \lg(U_{\partial} / U_{zi}).$$

$$K_{бгp-p} = 20 \lg\left(\frac{9500}{17460}\right) = -9,3 \text{ (дБ)},$$

$$K_{бзвum} = 20 \lg\left(\frac{9500}{8051}\right) = 5,43 \text{ (дБ)}.$$

Так як для трансформатора і вимикача  $K_{бз} < 40$  дБ, то обладнання не буде працювати стійко.

Для збільшення стійкості слід застосувати екранування. Перехідне затухання екрану:

$$A = K_{бном} - K_{бмін}, \text{ (дБ)};$$

де  $K_{бном}$  – номінальний коефіцієнт безпеки (40 дБ),

$K_{бмін}$  – мінімальний коефіцієнт безпеки, отриманий при розрахунку;

$$A = 40 - 5,43 = 34,57 \text{ (дБ)}.$$

Товщина захисного екрану

$$t = \frac{A}{5,2 \cdot \sqrt{f}}$$

де  $f$  – частота,



$$t = \frac{34,57}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,12 \quad (\text{см}).$$

Розрахуємо  $U_B$  трансформатора 630 кВА:

$$U_{BTP} = 11,58 * 0,251 = 2,91 (\text{кВ/м}).$$

Визначаємо коефіцієнти горизонтальної безпеки для трансформатора:

$$K_{\text{бзГр-р}} = 20 \lg \left( \frac{9500}{2,91} \right) = 70,2 \quad (\text{дБ}).$$

Так як  $K_{\text{бз}} < 40$  дБ, то обладнання буде працювати не стійко.

Розрахуємо  $U_B$  для вимикача 10 кВ:

$$U_B = 11,58 * 0,335 = 3,88 (\text{кВ/м}).$$

Визначаємо коефіцієнти безпеки для вимикача:

$$K_{\text{б}} = 20 \lg \left( \frac{9500}{3,88} \right) = 67,7 \quad (\text{дБ}),$$

Так як  $K_{\text{бз}} < 40$  дБ, то обладнання буде працювати не стійко.

Результати зведемо у таблицю 6.

Приймаємо, що вибір товщини захисного екрану для кабельних ліній не розглядається.

Таблиця 9.8 – Результати розрахунків пасивного екрану елементів СЕП

| Елементи СЕП   | $U_G, \text{кВ}$ | $U_B, \text{кВ}$ | $K_{\text{бв}}, \text{дБ}$ | $K_{\text{б,г}}, \text{дБ}$ | Товщина захисного екрану, см |
|----------------|------------------|------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Трансформатори | 17460            | 2,91             | 70,2                       | -9,3                        | 0,12                         |
| Вимикачі       | 8051             | 3,88             | 67,7                       | 5,43                        | 0,11                         |

Отже, спроектована система електроспоживання буде працювати стійко до дії іонізуючих випромінювань. А до дії ЕМІ – не стійко, але при

застосуванні захисного екрану для трансформаторів та вимикачів (0,12см), буде працювати стійко.

Відповідно, наша система при застосуванні вище вказаних заходів буде працювати стійко в умовах НС.

**Висновок:** Провівши аналіз, щодо стійкості системи електропостачання до дії ЕМІ, видно, що трансформатори та вимикачі найбільш уразливі, тому передбачила застосування захисного екрану (0,11см). Інші елементи (кабельні лінії) стійкі до дії ЕМІ, з коефіцієнтами безпеки 70,2 та 67,7 відповідно. Отже дія ЕМІ та іонізуючого випромінювання негативно впливають на роботу СЕП, що призводить до виходу з ладу, або ж повного знищення елементів системи електропостачання району житлової забудови, зокрема трансформатори та вимикачі. В результаті дослідження стійкості роботи системи електропостачання району житлової забудови до дії іонізуючих випромінювань, були визначено, що її елементи є стійкими, тому проводити додаткові заходи не потрібно.

Також в даному розділі було проведено дослідження стійкості роботи системи електропостачання шахтного обладнання в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій. Досліджена стійкість роботи СЕП в умовах дії іонізуючих випромінювань, час роботи якої в заданих умовах становить 13 років, для трансформаторів та 11 років для вимикачів, при рівні радіації 4,92 Р/год. Досліджена стійкість роботи СЕП в умовах впливу електромагнітного імпульсу.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи на тему «Підвищення ефективності комбінованих автономних систем електропостачання на базі електроустановок з відновлюваними джерелами енергії» були запропоновані рішення щодо підвищення ефективності функціонування комбінованих автономних систем електропостачання та отримано такі результати досліджень:

1. Розглянуті особливості застосування відновлюваних джерел електричної енергії, сучасні тенденції їх розвитку та концепції, а також вимоги, які пред'являються до комбінованих систем автономного електропостачання.

2. Обґрунтовано розробку структури КАСЕП. Розраховано потужності системи комбінованої системи автономного електропостачання на основі відновлювальних джерел енергії, визначено характеристики основних елементів системи КАСЕП.

3. Здійснено вибір та розрахунок елементів комбінованої автономної системи електропостачання, а саме: елементи фотогальванічної електростанції, проміжного накопичувача енергії, контролера ДГУ та інверторів СФЕС;

4. Розроблено схеми електричні структурні та принципові комбінованого автономного електротехнічного комплексу та блок-схему алгоритму оптимізації режимів його роботи. Система будується за модульним принципом з підключенням окремих генеруючих установок через індивідуальні силові перетворювачі. Енергетичний баланс із урахуванням надлишків енергії, що генерується від фотоелектричної станції, забезпечується за допомогою системи накопичення електроенергії. Запропоновано функціональний алгоритм взаємодії системи накопичення електричної енергії з дизель-генераторною установкою для автономних енергетичних комплексів, а також ефективні алгоритми керування їхніми робочими режимами із врахуванням оптимального завантаження ДГУ.

5. Методом комп'ютерного моделювання досліджено динамічні характеристики системи КАСЕП. Запропоновано модель фотоелектричного модуля, що дозволяє отримати вольтамперну та потужну характеристику за даними його технічної специфікації, модель системи накопичення електричної енергії з можливістю введення технічних параметрів через діалогове вікно, що дозволяє легко її модифікувати та використовувати для дослідження характеристики акумуляторів різних типів. а також для побудови моделей фотоелектричних систем довільної конфігурації на їх основі; модель автономного споживача електроенергії та методика аналізу режимів електроспоживання автономними енергетичними системами.

6. Виконано техніко-економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електропостачання. Визначено, що за рахунок впровадження запропонованих рішень досягається економія річних експлуатаційних витрат. Це підтверджує правильність виконаних досліджень та економічну доцільність впровадження даного технічного рішення.

7. Визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Marti A. Next Generation Photovoltaics / A. Marti, A. Luque eds. – Bristol: Institute of Physics Publ., 2004 – 344 с.
2. Абрамова О. Види та типи: схеми сонячних електростанцій / О. Абрамова // Матеріали сайта. – 2016. – Режим доступу: <http://ukrenerho.com/vidi-ta-tipishemi-sonyachnih-elektrostantsij/>
3. Chapin D. M., Fuller C. S., Pearson G. L. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power // Journal of Applied Physics. – 1954. – Т. 25, №. 5. – Р. 676–677
4. Ginley D. S. Fundamentals of materials for energy and environmental sustainability / D. S. Ginley, D. Cahen (ed.). – Cambridge university press, 2011. – 754 p.
5. Wei C. Y. Efficiency improvement of HIT solar cells on p-type Si wafers / C.Y. Wei et al. // Materials. – 2013. – Vol. 6, №. 11. – Р. 5440–5446.
6. Green M. A. Third generation photovoltaics: advanced solar electricity generation / M. A. Green. – Springer-Verlag, Berlin. – 2003. – 160 p.
7. Бабак В.П., Білецький А.Я., Гуржій А.М. Сигнали і спектри. – К.: Книжкове вид-во НАУ, 2005. – 492 с
8. Електроніка і мікросхемотехніка : Підручник для вищ. навч. закл. освіти : У 4-х т./ В.І. Сенько, М.В. Панасенко , Є.В. Сенько та ін.; Під ред. В.І. Сенька. – К.: ТВО "Видавництво Обереги", 2000. – Т.1. Елементна база електронних пристроїв. – 309 с.
9. Михальський В.М., Соболев В.М., Чехет Е.М. Векторна широтноімпульсна модуляція в матричних перетворювачах. Навчальний посібник. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2003. – 74с.
10. Сосков А. Г. Промислова електроніка : підручник / А. Г. Сосков, Ю. П. Колонтаєвський ; за ред. А. Г. Соскова. – Київ : Каравела, 2015. – 536 с.

11. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник для студентів вузів / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков ; за ред. д-ра техн. наук, проф. А. Г. Соскова. – [2-ге вид.]. – Київ : Каравела, 2009. – 416 с.
12. Солнечная энергетика : учебн. пособие / В. И. Виссарионов, Г. В. Дерюгина, В. А. Кузнецова, Н. К. Малинин. – М. : Издательский дом МЭИ, 2008. – 317 с.
13. Тугай Д. В. Моделювання режимів роботи сонячної електростанції в SMART GRID системі електропостачання / Д. В. Тугай, Ю. П. Колонтаєвський, С. В. Котелевець, Е. С. Савчук // : Актуальні проблеми світлотехніки : матеріали VI міжнар. наук.-техн. конф. – Харків, 4–6 жовтня 2017 р. / Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – С. 132–133.
14. Сонячна батарея JA Solar JAP6-270 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ecoenerhiia.ua/sonjachni-batarei/sonjachna-batareja-ja-solar-jap6-270-poly.html>.
15. Roberts, P. Performance of Rotors in a Brushless Doubly-Fed Induction Machine (BDFM) [Электронный ресурс] / P. C. Roberts, R. A. McMahon, P.J. Tavner, J. M. Maciejowski, T. J. Flack, X. Wang // International Conference of Electrical Machines, 2004, Cracow, Poland. URL : <http://www.ime.pw.edu.pl/zme/pryw/bienpdf/dfim2.pdf>
16. Лежнюк П.Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЕС. / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, І.О. Гунько - УДК 621.316.
17. Лежнюк П. Д. Вплив інверторів сес на показники якості електричної енергії в лес / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - 2015. - № 2. - С. 134-145. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu\\_tekh\\_2015\\_2\\_28](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2015_2_28).
18. Лежнюк П.Д. Оперативне діагностування високовольного обладнання в задачах оптимального керування режимами

електроенергетичних систем / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, О.В. Нікіторович // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 35–36.

19. Будівництво промислових СЕС [Електронний ресурс] / Інжинірингова компанія – Нові енергетичні технології. – Режим доступу : <http://iknet.com.ua/uk/presentation/full/ses>

20. Solar PV industry. Market and industry trends. Global status report. Renewables. Steering committee. Ren. 21. 2014. P. 48–50. URL: [http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014\\_full%20report\\_low%20res.pdf](http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf)

21. Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й. Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. Моделювання електромеханічних систем. – Кременчук, 2001. – 376 с.

22. Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2022)», Вінниця, 2022. [Електронний ресурс]. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 3 с.

23. Демов О. Д., Бірюков О. О., Мельничук Л. М., Демов А. Д., Бірюков А. А., Мельничук Л. М., Demov O. D., Biryukov A. A., Melnychuk L. M.. Розрахунок собівартості електроенергії на промисловому підприємстві. Демов О. Д. Розрахунок собівартості електроенергії на промисловому підприємстві [Текст] : навчальний посібник / О. Д. Демов, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 92 с.

24. Кобилянський О.В., Терещенко О.П. Методичні вказівки щодо опрацювання розділу охорона праці в дипломних проектах і роботах студентів електротехнічних спеціальностей. – Вінниця 2003. –46 с.

25. НПАОП 40.1-1.32-01.(ДНАОП 0.00-1.32-01).Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.[Чинний від 2002-01-01].URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01>.

26. ДСТУБ В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01].Вид. офіц. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.



Додаток А

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

 Микола МОШНОРИЗ

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНИХ АВТОНОМНИХ  
СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК  
З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ**

08-24.МКР.018.00.000 ТЗ

Керівник роботи

к.т.н., доц.

 Олександр ПАЯНОК

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-21м

 Роман ЩЕРБИНА

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

Вінниця ВНТУ 2023



## **1 Загальні відомості**

Повне найменування розробки «Підвищення ефективності комбінованих автономних систем електропостачання на базі електроустановок з відновлюваними джерелами енергії».

Скорочене найменування розробки – «Підвищення ефективності комбінованих автономних систем електропостачання на базі електроустановок з відновлюваними джерелами енергії».

Замовник – Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

## **2 Підстави для розробки**

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем магістерських кваліфікаційних робіт.

## **3 Призначення розробки і галузь використання**

Комбінована автономна система електропостачання на основі відновлювальних джерел енергії є автономним джерелом електроенергії для забезпечення потреб споживача. СФЕС, ДГУ та НЕЕ забезпечують необхідні режими роботи системи електропостачання споживача відповідно до заданих алгоритмів функціонування.

## **4 Вимоги до розробки**

Комбінована автономна система електропостачання на основі відновлювальних джерел енергії повинна забезпечувати споживача електроенергією а також запасати її в акумуляторних батареях для живлення споживача в умовах не здатності генератора установки та ФЕС генерувати потужність. Топологія КСАЕП повина мати можливість варіювання з використанням засобів силової електроніки (узгоджувальних DC/DC перетворювачів) з метою мінімізації габаритів і кількості компонентних

блоків, в залежності від необхідності нарощування або скорочення генеруючих потужностей.

## 5 Комплектація розробки

Структура комбінованої автономної системи електропостачання включає в себе: DC/DC – перетворювач постійного струму; СФЕС – сонячна фотоелектрична станція; АКБ – акумуляторна батарея; ДГУ – дизель-генератор; СГПМ – синхронний генератор із постійними магнітами.

## 6 Джерела розробки

1. Marti A. Next Generation Photovoltaics / A. Marti, A. Luque eds. – Bristol: Institute of Physics Publ., 2004 – 344 с.

2. Абрамова О. Види та типи: схеми сонячних електростанцій / О. Абрамова // Матеріали сайта. – 2016. – Режим доступу: <http://ukrenerho.com/vidi-ta-tipishemi-sonyachnih-elektrostantsij/>

3. Chapin D. M., Fuller C. S., Pearson G. L. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power // Journal of Applied Physics. – 1954. – Т. 25, №. 5. – P. 676–677

4. Ginley D. S. Fundamentals of materials for energy and environmental sustainability / D. S. Ginley, D. Cahen (ed.). – Cambridge university press, 2011. – 754 p.

## 7 Технічні характеристики

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики СФЕС

| № п/п | Найменування технічної складової                                    | Кількість |
|-------|---|-----------|
| 1     | Загальна кількість фотогальванічних панелей потужністю 270 Вт (шт.) | 35        |
| 2     | Кількість інверторів DiehlPlatinum 3000 Н                           | 1         |
| 3     | Кількість інверторів DiehlPlatinum 7200TL                           | 1         |
| 4     | Номінальна потужність електростанції (кВт)                          | 10        |

## **8 Етапи виконання**

|                  |  |
|------------------|--|
| Основна частина  |  |
| Графічна частина |  |

## **9 Елементна база**

Синхронний генератор з постійними магнітами, перетворювач постійного струму, фотоелектрична станція, баластні навантаження, акумуляторна батарея, контактори, дизель-генератор, дизель-електрична станція, автоматичні вимикачі країн близького зарубіжжя та світу.

## **10 Конструктивне виконання**

Система КАСЕП виготовляється окремими блоками, котрі реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки у пиловологозахищеному виконанні.

## **11 Показники технологічності**

Синхронний генератор з постійними магнітами, перетворювач постійного струму, фотоелектрична станція, баластні навантаження, акумуляторна батарея, контролер, АКБ та інвертор, сенсори, модуль передачі даних та мікроконтролер виконуються на сучасній елементній базі, їх монтаж, заземлення, струмопровід повинні відповідати правилам улаштування електроустановок.

## **12 Технічне обслуговування і ремонт**

До оперативного обслуговування електроустановками допускаються працівники, які знають їхні схеми, інструкції з експлуатації, особливості конструкції та роботи обладнання і пройшли навчання та перевірку знань.

### **13. Живлення системи**

Живлення електротехнічного комплексу повинно бути виконано: величина напруги постійного струму – це, як правило, 12, 24 або 48, а змінного струму 220 В - в однофазному і 380 В - в трифазному виконанні.

### **13 Порядок контролю та прийняття**

Виконання етапів графічної та розрахункової документації магістерської кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

**Додаток Б**  
**(обов'язковий)**

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНИХ  
АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ  
ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК З ВІДНОВЛЮВАНИМИ  
ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ**

## **Мета, задачі та об'єкт дослідження**

**Об'єкт** дослідження є процеси перетворення енергії в комбінованих автономних системах електропостачання з відновлювальними джерелами енергії на основі фото-дизельних електротехнічних комплексів.

**Предметом** дослідження є математичні моделі та структури, які дозволяють підвищити ефективність комбінованих автономних систем електропостачання з відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ).

**Мета і завдання дослідження.** Полягає в підвищенні енергоефективності автономних комбінованих систем електропостачання з використанням відновлювальних джерел електроенергії шляхом оптимізації їх складу та режимів роботи з використанням інтеграції ДГУ та СФЕС.

До **задач** магістерської кваліфікаційної роботи можна віднести:

- аналіз існуючих комбінованих систем автономного електропостачання на основі відновлювальних джерел енергії;
- техніко-економічний розрахунок впровадження комбінованої системи автономного електропостачання на основі відновлювальних джерел енергії;
- розрахунок та вибір елементів комбінованої системи автономного електропостачання на базі відновлювальних джерел енергії;
- розробка схеми електричної структурної електротехнічного комплексу комбінованої автономної системи електропостачання;
- розробка схем електричних принципових модулів електротехнічного комплексу комбінованої автономної системи електропостачання;
- розробка алгоритму оптимізацій структури та режимів роботи енергетичного обладнання системи КАСЕП;
- імітаційне моделювання режимів роботи комбінованої системи автономного електропостачання на основі фото-дизельних електротехнічних комплексів.

## Загальна характеристика систем ЕП на основі ВДЕ



Рисунок 1 – Відновлювальні джерела енергії (ВДЕ)



Рисунок 3 – Фотоелектрична станція



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд ДГУ

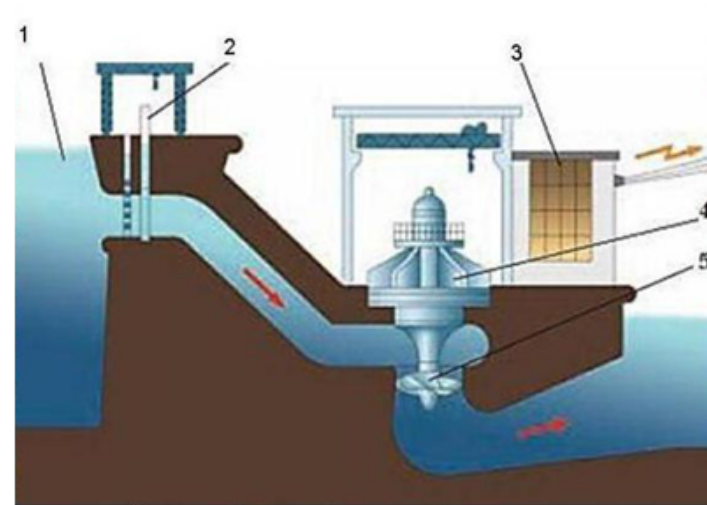


Рисунок 4 – Схема влаштування міні-ГЕС



# Концепції побудови автономних СЕП на основі ВДЕ



Рисунок 5 – Прикладом концепції Smart Grid - Microgrid

## Концепції побудови автономних СЕП на основі ВДЕ

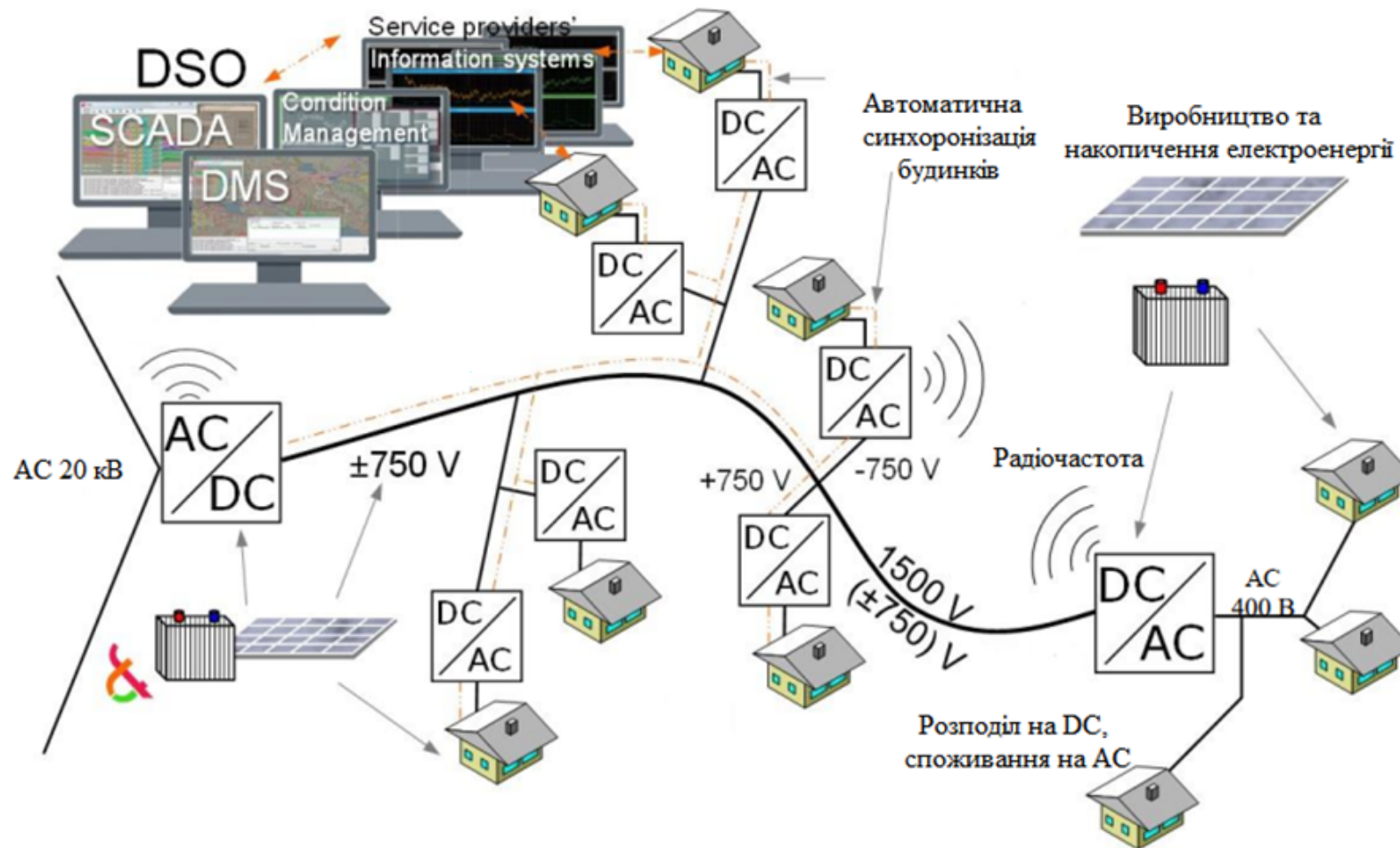


Рисунок 6 – Реалізація концепції LVDC RULES

Розподільна мережа LVDC поєднує в собі розподіл постійного струму, силову електроніку та систему інформаційних та комунікаційних каналів, які є ключовими складовими для мікромережових рішень

## ОБГРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА СТРУКТУРИ КАСЕП.

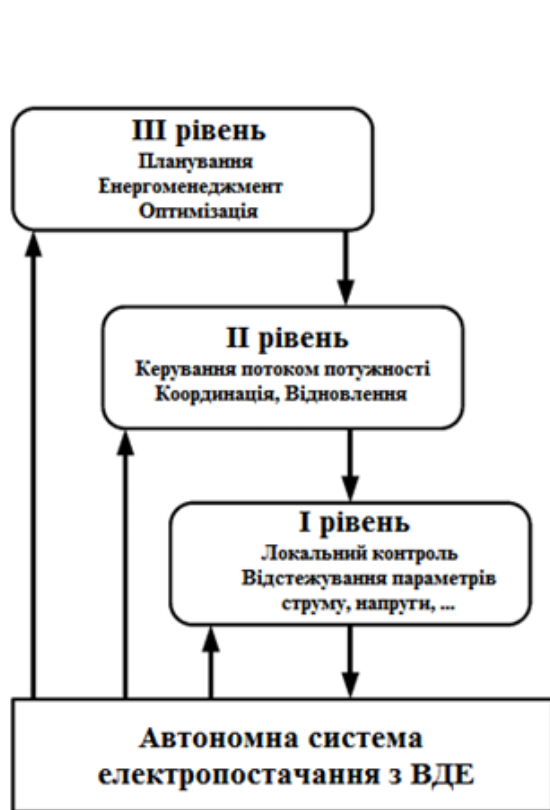


Рисунок 7 – Рівні контролю гібридної автономної системи ЕП

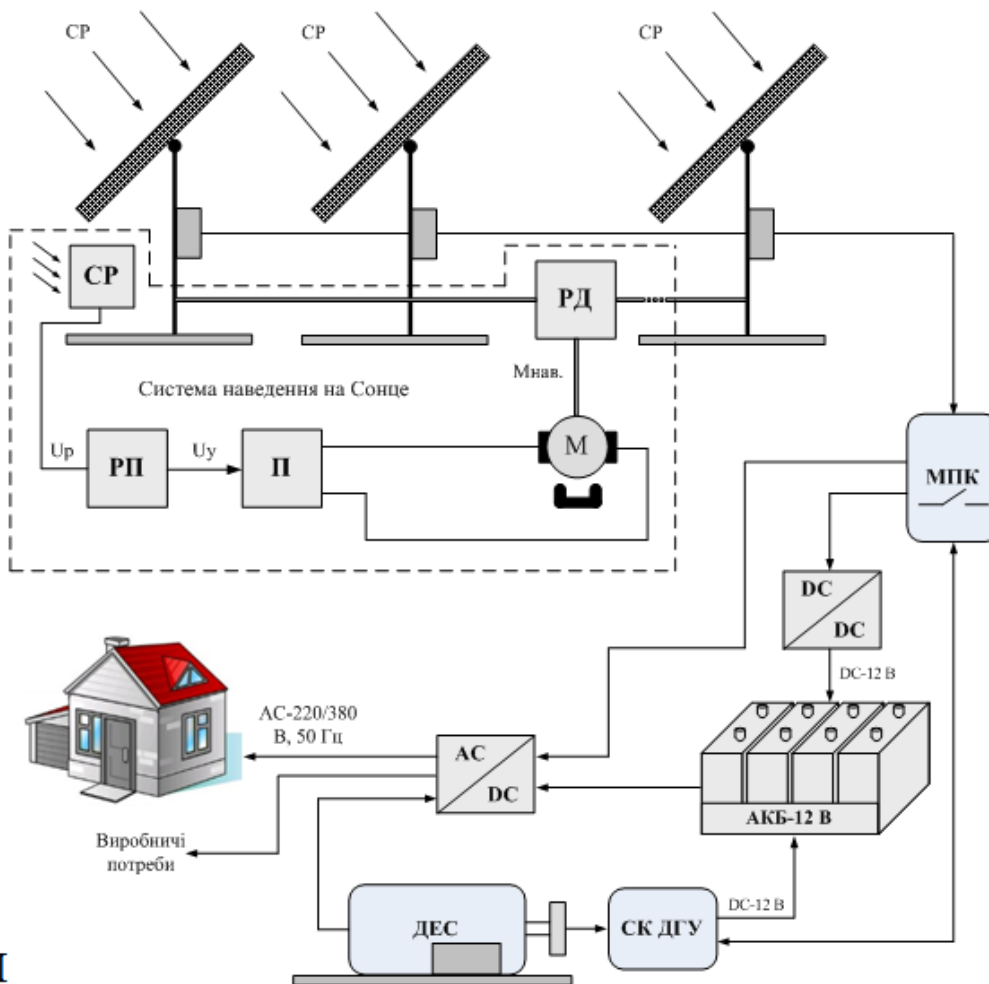


Рисунок 8 – Структурна блок-схема системи КСАЕП

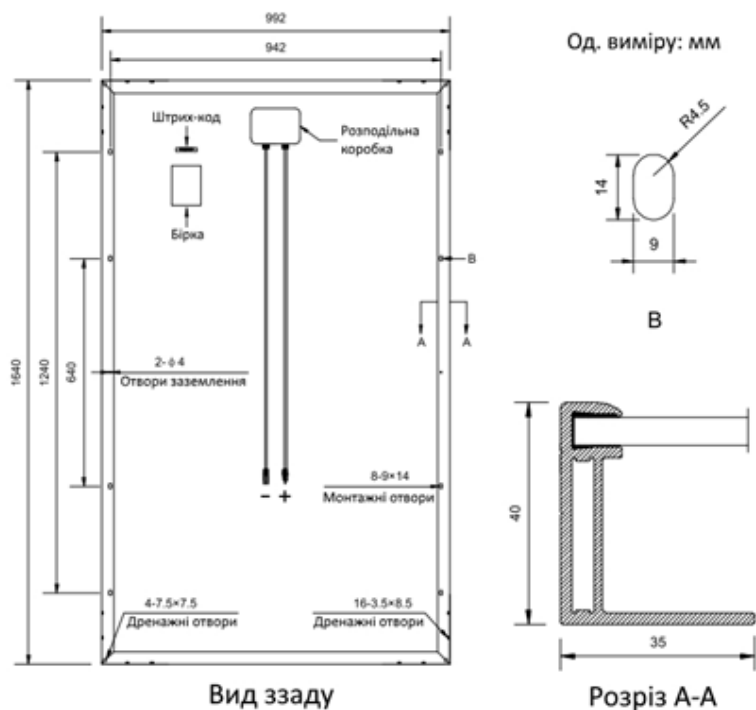
## ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ КСАЕП (СФЕС)

Технічні характеристики ФЕС

| № п/п | Найменування технічної складової                                    | Кількість |
|-------|---|-----------|
| 1     | Загальна кількість фотогальванічних панелей потужністю 270 Вт (шт.) | 35        |
| 2     | Кількість інверторів Diehl Platinum 3000 H                          | 1         |
| 3     | Кількість інверторів Diehl Platinum 7200TL                          | 1         |
| 4     | Номінальна потужність електростанції (кВт)                          | 10        |

Основні параметри фотогальванічних панелей типу REC270PE BLACK

| № п/п | Найменування показника                                    | REC270PE BLACK |
|-------|---|----------------|
| 1     | Максимальна потужність, $P_m$                             | 270 Вт         |
| 2     | Струм короткого замикання, $I_k$                          | 9,29 А         |
| 3     | Напруга холостого ходу, $U_{xx}$                          | 38,6 В         |
| 4     | Напруга в режимі видачі максимальної потужності, $U_{mp}$ | 31,2 В         |
| 5     | Номінальний струм, $I_{mp}$                               | 8,67 А         |
| 6     | Габаритні розміри (Д, Ш, Т), мм                           | 1665x991x38    |
| 7     | Вага  | 19кг           |
| 8     | Відносне значення ефективності                            | 16,4 %         |



## ОБГРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР СТРІНГОВИХ ІНВЕРТОРІВ

Таблиці 2 – Основні характеристики інвертора Platinum 3000 Н та Platinum 7200 TL

| Вхідні параметри інвертора (DC)                       | Значення параметра |
|---|--------------------|
| Максимальна потужність при постійному струмі, кВт     | 3,0                |
| Максимальне значення напруги при постійному струмі, В | 600                |
| Максимальний струм на кожний MPPT, А                  | 13,5               |
| Максимальний вхідний струм, А                         | 20,2               |
| Діапазон MPPT на 100% потужності, В                   | від 230 до 480     |
| Максимальна кількість входів                          | 3                  |
| Кількість MPPT трекерів                               | 1                  |
| Вихідні параметри інвертора (AC)                      |                    |
| Номинальна активна потужність, кВт                    | 2,9                |
| Максимальна повна потужність, кВА                     | 2,9                |
| Максимальна активна потужність (cosφ=1), кВт          | 2,9                |
| Номинальна напруга, В                                 | 230 (+/-20%)       |
| Номинальна частота, Гц                                | 50 (+/-10%)        |
| Номинальний струм, А                                  | 13                 |
| Кількість фаз/кількість виходів                       | 1/3                |
| Коефіцієнт потужності, cosφ                           | 0,9                |
| Загальні параметри інвертора                          |                    |
| Діапазон робочих температур, °С                       | від -25 до +65     |
| Відносна вологість, %                                 | від 4 до 99%       |
| Клас захисту оболонки                                 | IP65               |
| Висота установки, м                                   | від 0 до 2000      |
| Габаритні розміри (ШхДхВ), мм                         | 610 x 353 x 154    |
| Вага, кг  | 19                 |

| Вхідні параметри інвертора (DC)                       | Значення параметра |
|---|--------------------|
| Максимальна потужність при постійному струмі, кВт     | 7,2                |
| Максимальне значення напруги при постійному струмі, В | 880                |
| Максимальний струм на кожний MPPT, А                  | 21                 |
| Діапазон MPPT на 100% потужності, В                   | від 351 до 710     |
| Максимальний вхідний струм, А                         | 26                 |
| Максимальна кількість входів                          | 3                  |
| Кількість MPPT трекерів                               | 1                  |
| Вихідні параметри інвертора (AC)                      |                    |
| Номинальна активна потужність, кВт                    | 6,9                |
| Максимальна повна потужність, кВА                     | 6,9                |
| Номинальна напруга, В                                 | 230 (+/-20%)       |
| Номинальна частота, Гц                                | 50 (+/-20%)        |
| Номинальний струм, А                                  | 30                 |
| Кількість фаз/кількість виходів                       | 1/1                |
| Коефіцієнт потужності, cosφ                           | 0,7                |
| Загальні параметри інвертора                          |                    |
| Діапазон робочих температур, °С                       | від -20 до +60     |
| Відносна вологість, %                                 | від 0 до 95%       |
| Клас захисту оболонки                                 | IP66               |
| Висота установки, м                                   | від 0 до 2000      |
| Габаритні розміри (ШхДхВ), мм                         | 720 x 320 x 250    |
| Вага, кг  | 29                 |

# ОБГРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР ДГУ ТА КОНТРОЛЕРА КЕРУВАННЯ

DSE6120 MKII



Рисунок 9 – ДЕС типу Hyundai DHY 12000SE-3



Рисунок 10 – Зовнішній вигляд контролера DSE 6120

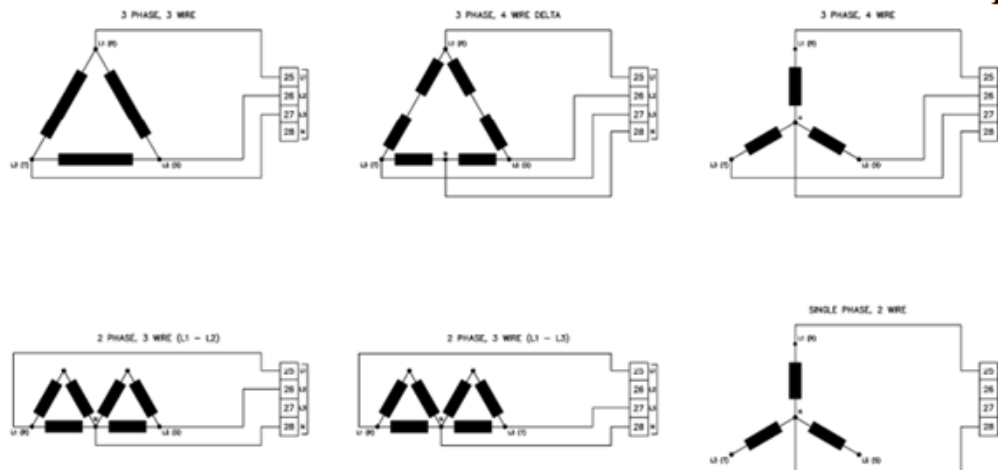


Рисунок 11 – Топологія підключення обмоток ДГУ через DSE 6120



## Схема електрична принципова системи КАСЕП

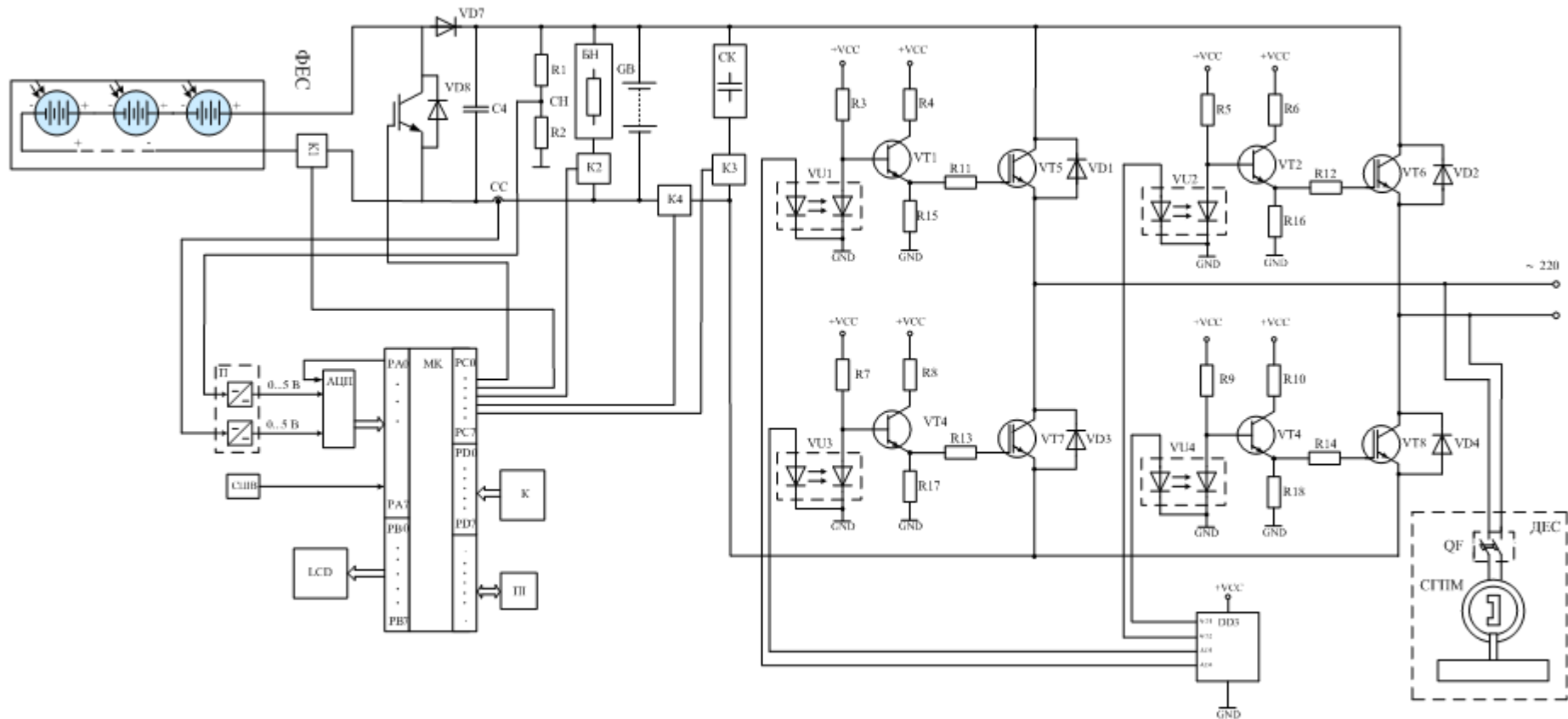
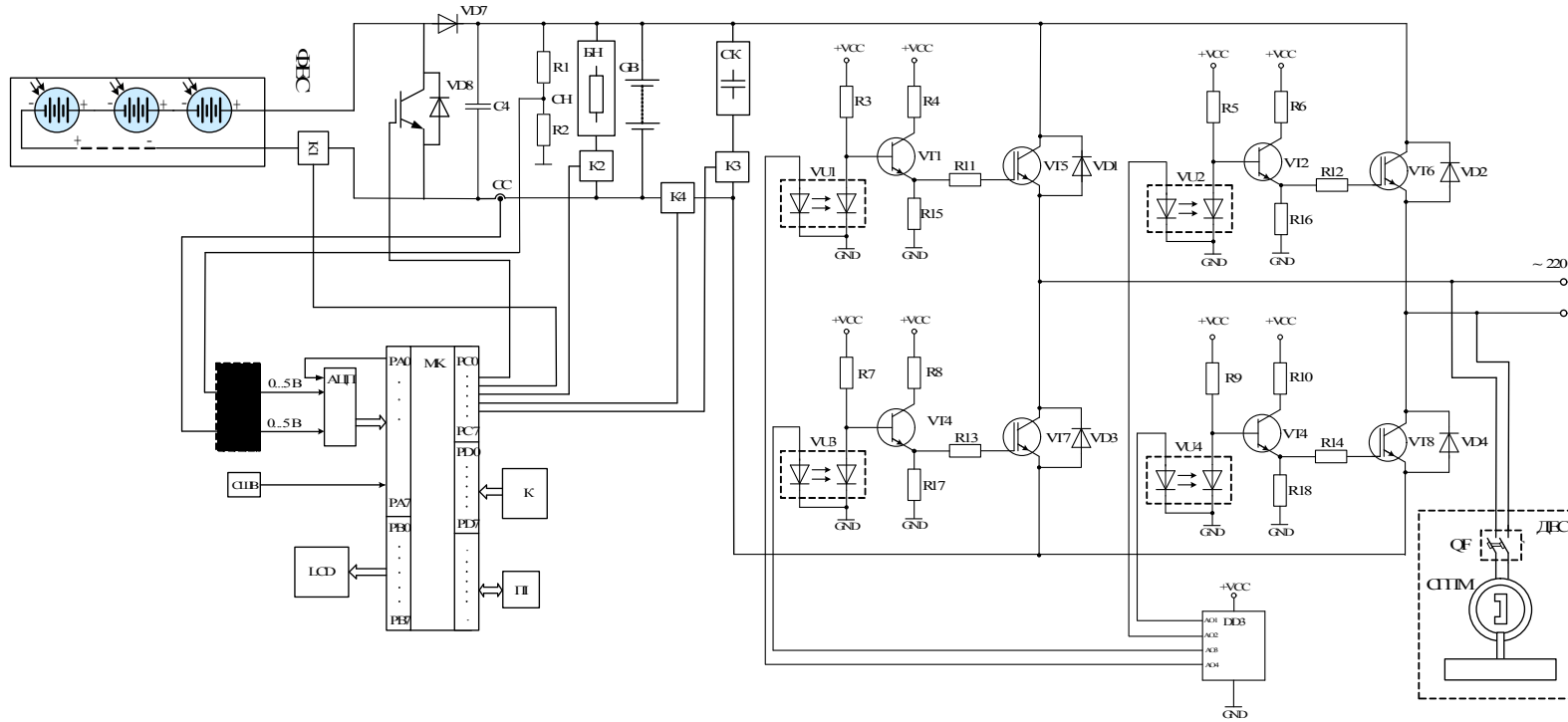


Рисунок 12 – Схема електрична принципова електротехнічного комплексу системи КАСЕП

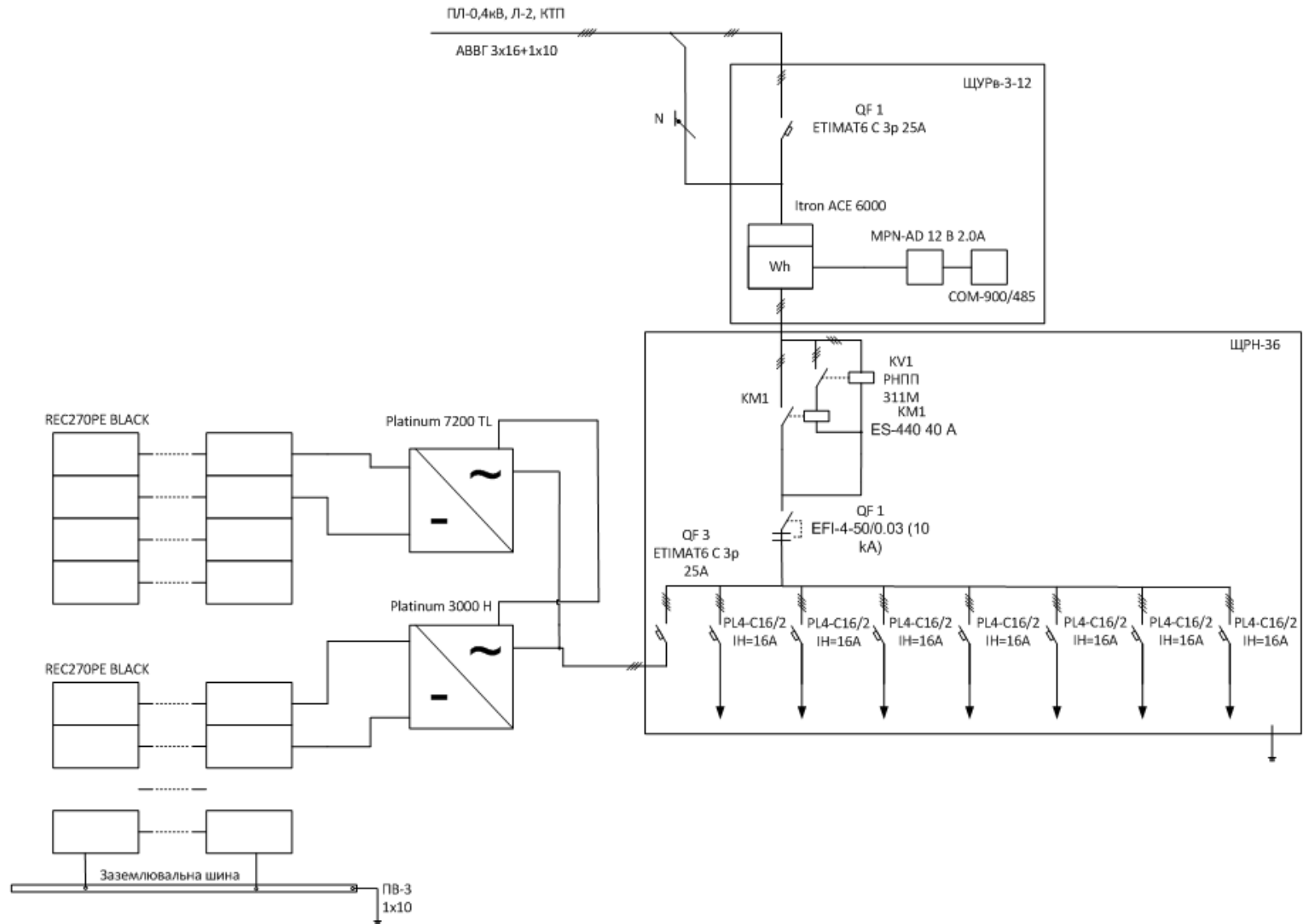


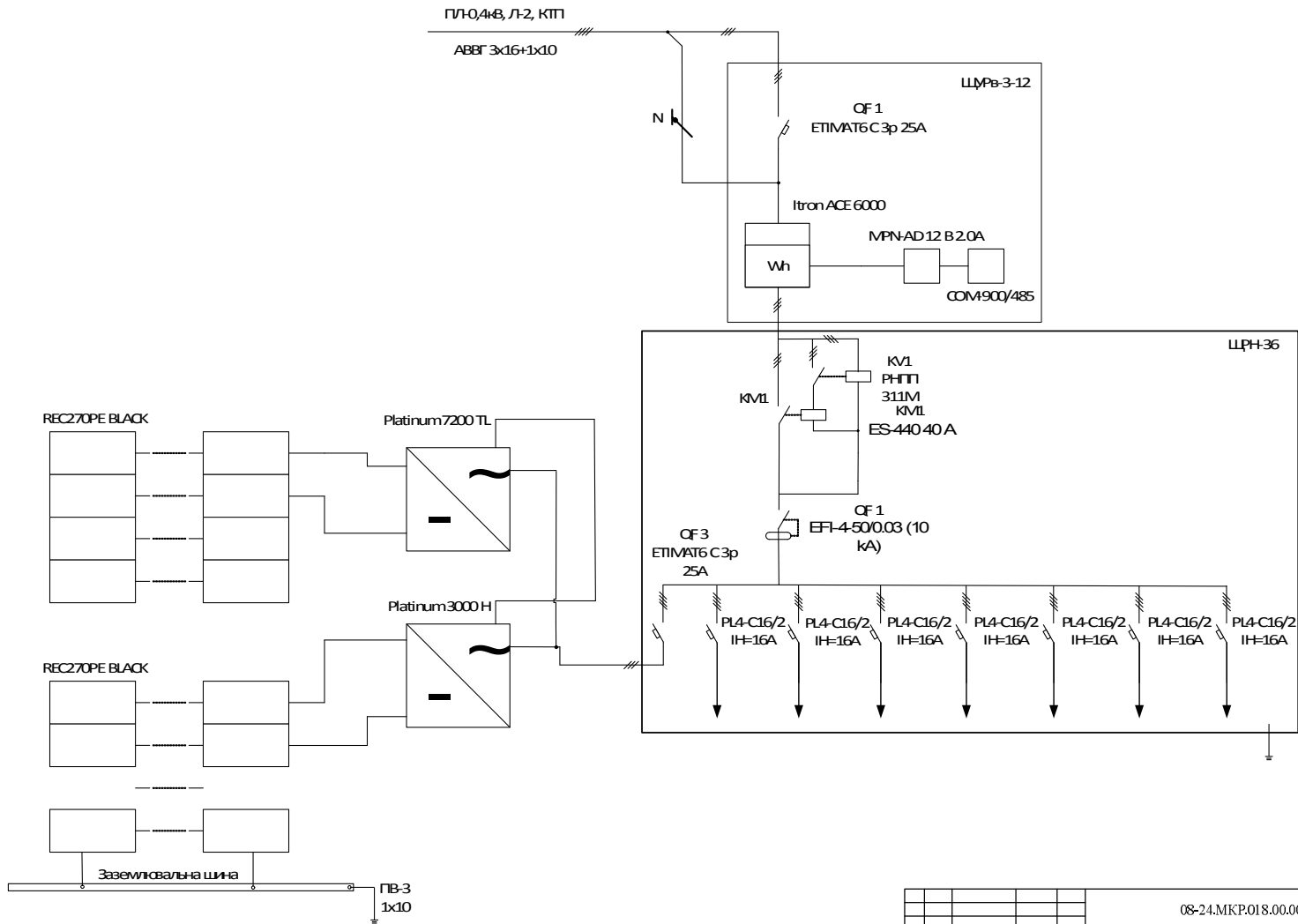


|        |            |              |        |            |
|--------|------------|--------------|--------|------------|
| Изм. № | План. дата | Взам. инв. № | Инв. № | План. дата |
| погр.  |            | доку.        |        |            |

|  |               |              |         |           |
|--|---------------|--------------|---------|-----------|
| 08-24.МКР.018.00.000.Е3  |               |              |         |           |
| Экз.   | Арх.          | РФ документа | Листов  | Дата      |
| Разработчик  | Щербина Е.В.  |              |         |           |
| Проектировщик  | Павлов С.А.   |              |         |           |
| Т. контрол.  |               |              |         |           |
| Тщательная проверка эффективности комбинированных автономных систем электроснабжения на базе электростанций с использованием джерелаля енергії. Система електрична принципова системи ЕАСЕП. |               |              |         |           |
| Нормировщик  | Павлов С.А.   |              |         |           |
| Защита   | Молчанов М.М. |              |         |           |
|  |               |              | Лист    | Масштаб   |
|  |               |              | Аркуш 1 | Аркушів 1 |
| гр. ЕПА-22М  |               |              |         |           |

# Схема електрична принципова підсистеми СФЕС

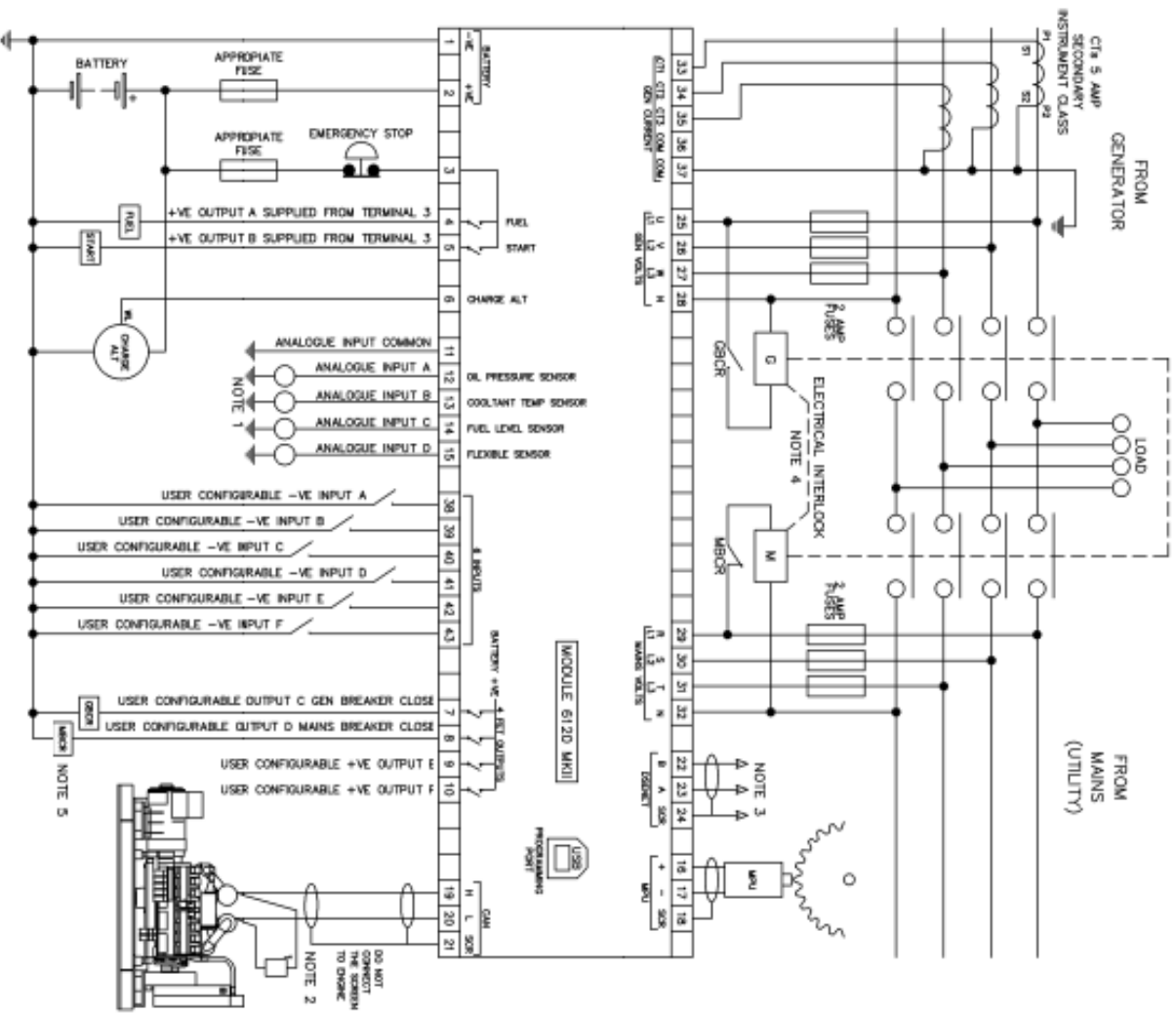




|        |             |              |        |             |
|--------|-------------|--------------|--------|-------------|
| Лист № | План і дата | Взам. Лист № | Лист № | План і дата |
| 1001   |             |              | 1001   |             |

|            |              |                 |         |      |   |  |  |             |           |         |
|------------|--------------|-----------------|---------|------|---|--|--|-------------|-----------|---------|
|            |              |                 |         |      | 08-24.МКР.018.00.000.Е3   |  |  |             |           |         |
| Зм.        | Арх.         | РФ документації | Лістинг | Дата | Технічний електричний проект автоматизованої системи електропостачання на базі електростанції з відновлюваними джерелами енергії. Однoliniйна принципова електрична схема СФЕС КАСЕЛІ |  |  | Лист        | Маса      | Масштаб |
| Розробив:  | Щербина Е.В. |                 |         |      |   |  |  |             |           |         |
| Перевірив: | Павлюк О.А.  |                 |         |      |   |  |  |             |           |         |
| Т. констр. |              |                 |         |      |   |  |  |             |           |         |
| Нормуючі:  | Павлюк О.А.  |                 |         |      |   |  |  | Аркуш 1     | Аркушів 1 |         |
| Затверд.   | Молочко М.М. |                 |         |      |   |  |  | гр. ЕПА-22М |           |         |

08-24.БДР.018.00.000 ЕЗ



08-24.БДР.018.00.000 ЕЗ

|   |                |              |        |                   |         |         |
|---|----------------|--------------|--------|-------------------|---------|---------|
| Інв. №  | Підпис та дата | На зам. інв. | Інв. № | Підпис та дата    |         |         |
|   |                |              |        |                   |         |         |
| Зм. Арк.  | № ДОКУМ.       | Піпц.        | Дата   |                   |         |         |
| Розробив  | Щербина Р.В.   |              |        |                   |         |         |
| Перевірив   | Павлюк О.А.    |              |        |                   |         |         |
| Т. КОНТР.   |                |              |        |                   |         |         |
| ІН.КОНТР.   | Павлюк О.А.    |              |        |                   |         |         |
| Забв.   | Молиторз М.М.  |              |        |                   |         |         |
| <p>Підвищення ефективності комбінованих автономних систем електропостачання на базі електроустановок з відновлюваними джерелами енергії. Схема електрична принципова підключення МКДСЕ 6120</p> |                |              |        | Літера            | Маса    | Масштаб |
|   |                |              |        | У                 |         |         |
|   |                |              |        | Аркуш 1           | Аркушів |         |
|   |                |              |        | ВНТУ, гр. ЕПА-22м |         |         |

# АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ КАСЕП

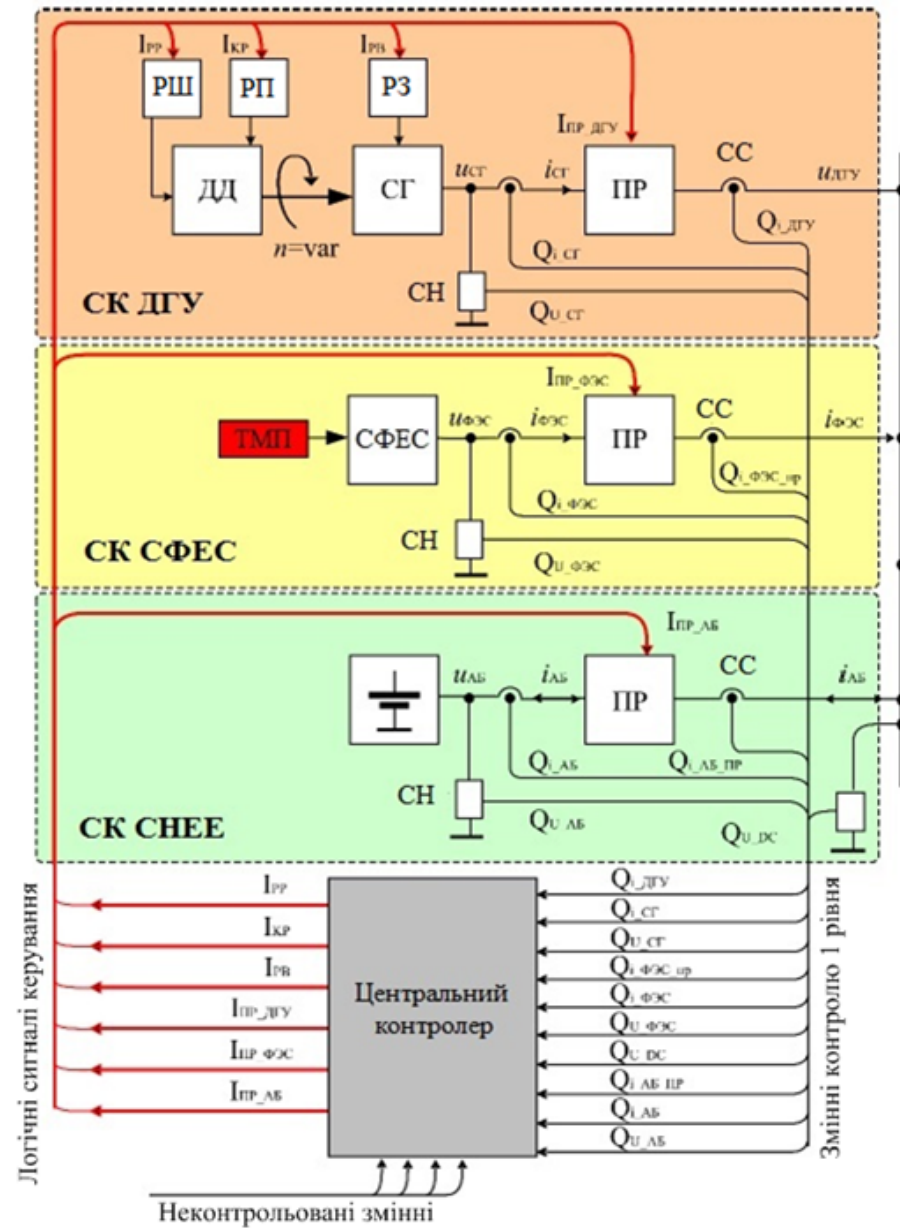


Рисунок 14 – Алгоритм узгодженої роботи різнотипних установок ВДЕ

## Імітаційне моделювання підсистем КАСЕП

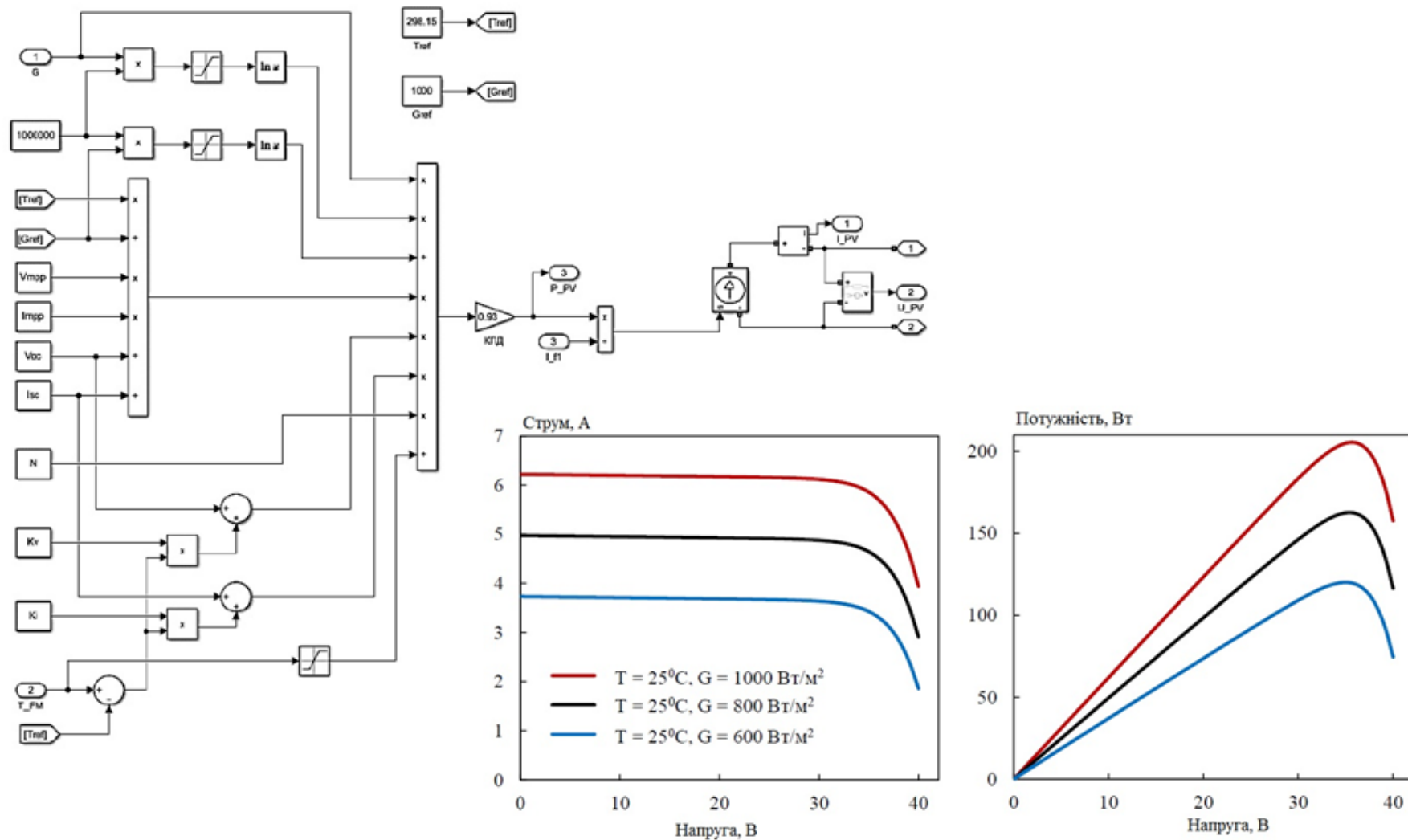


Рисунок 15 – Модель підсистеми СФЕС та її характеристики

## Імітаційне моделювання підсистем КАСЕП

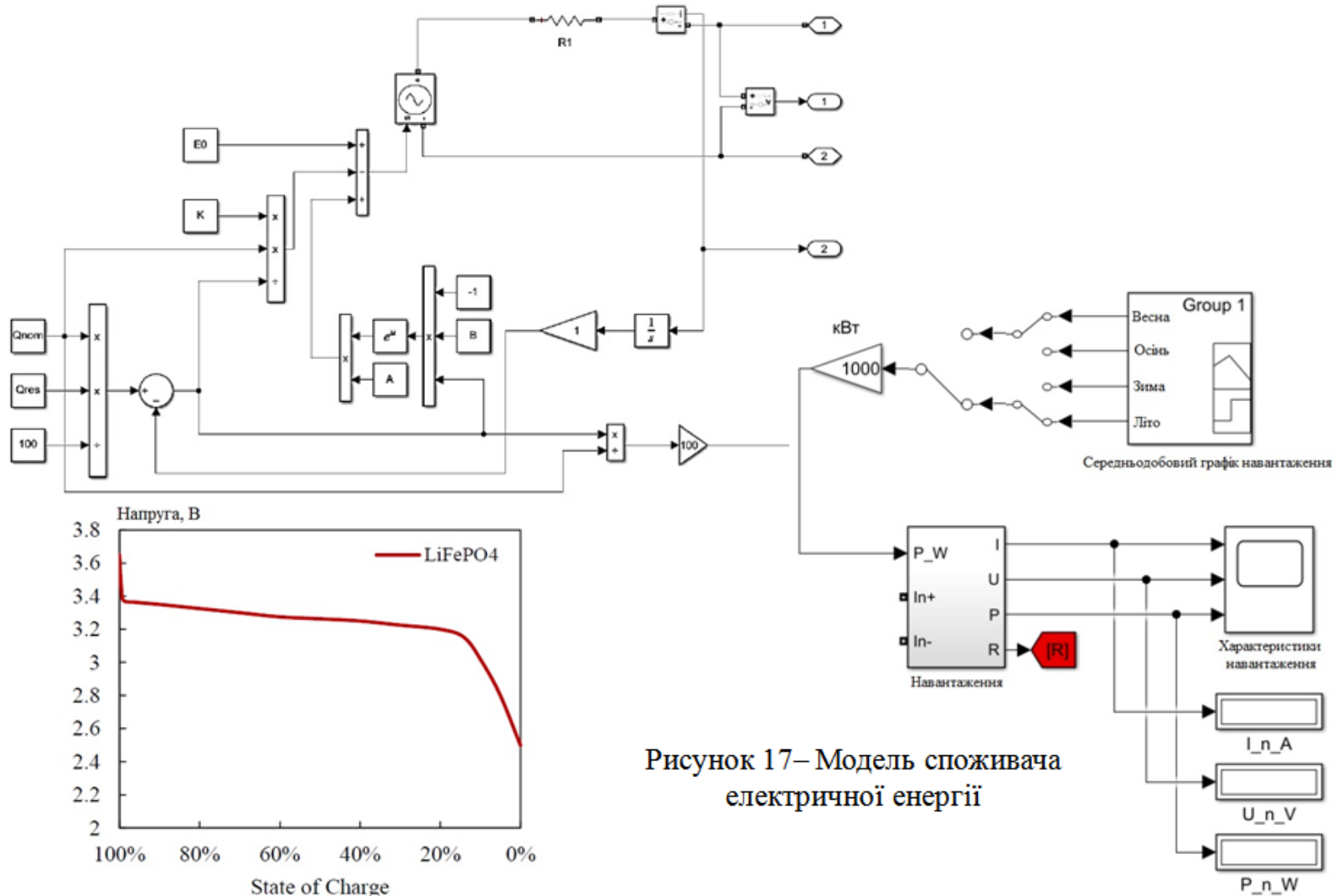


Рисунок 16 – Модель підсистеми накопичення електричної енергії та розрядна характеристика одиничного акумулятора

Рисунок 17– Модель споживача електричної енергії



## ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ КОМБІНОВАНОЇ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ

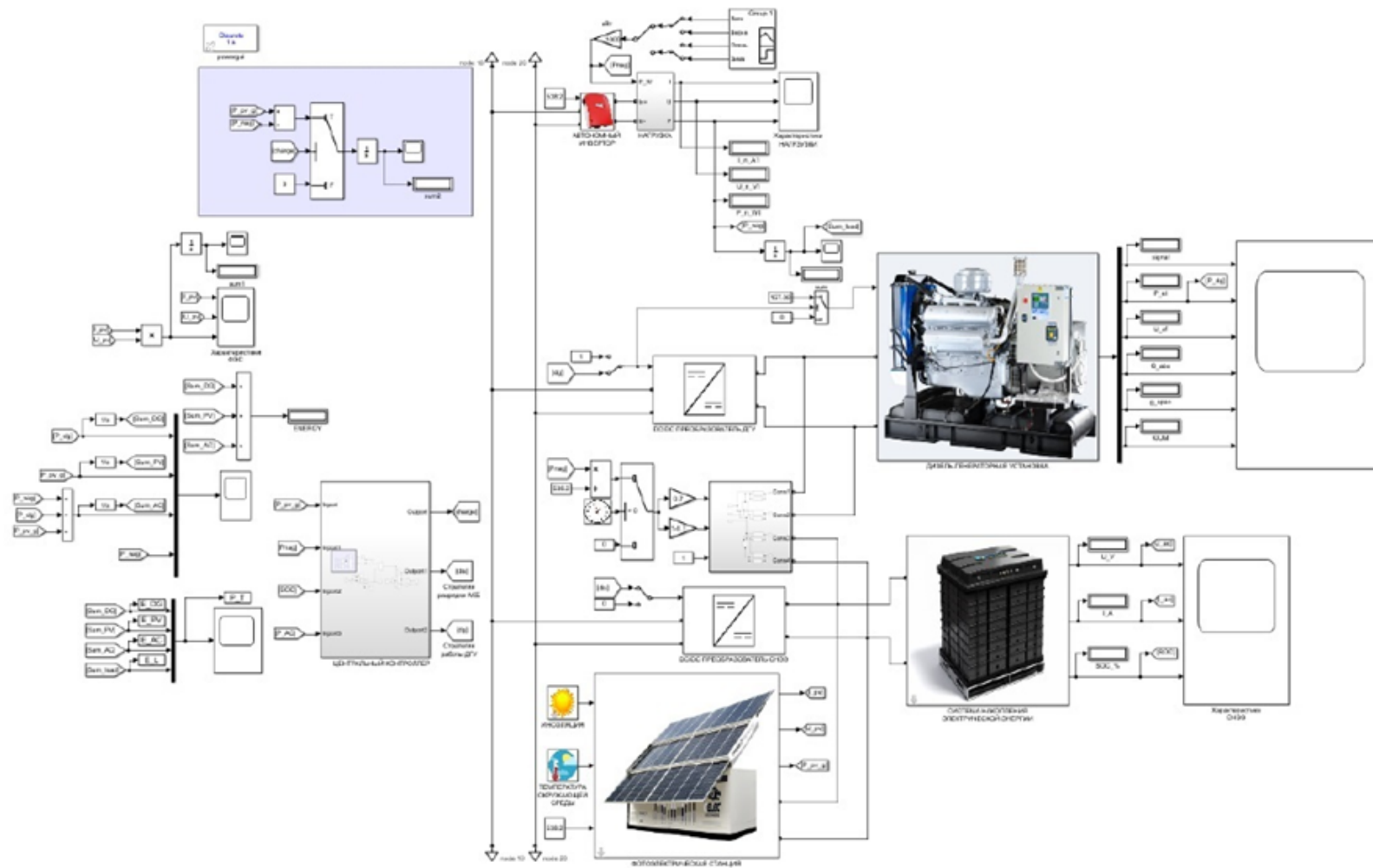


Рисунок 18 – Модель автономної СЕП в MATLAB Simulink

## ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ КОМБІНОВАНОЇ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ

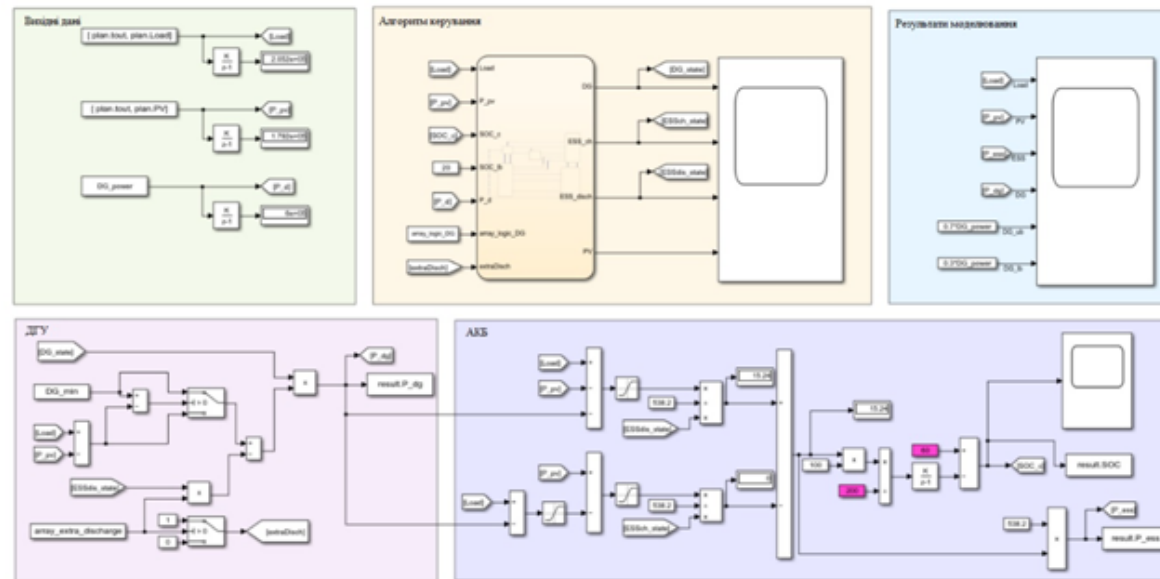
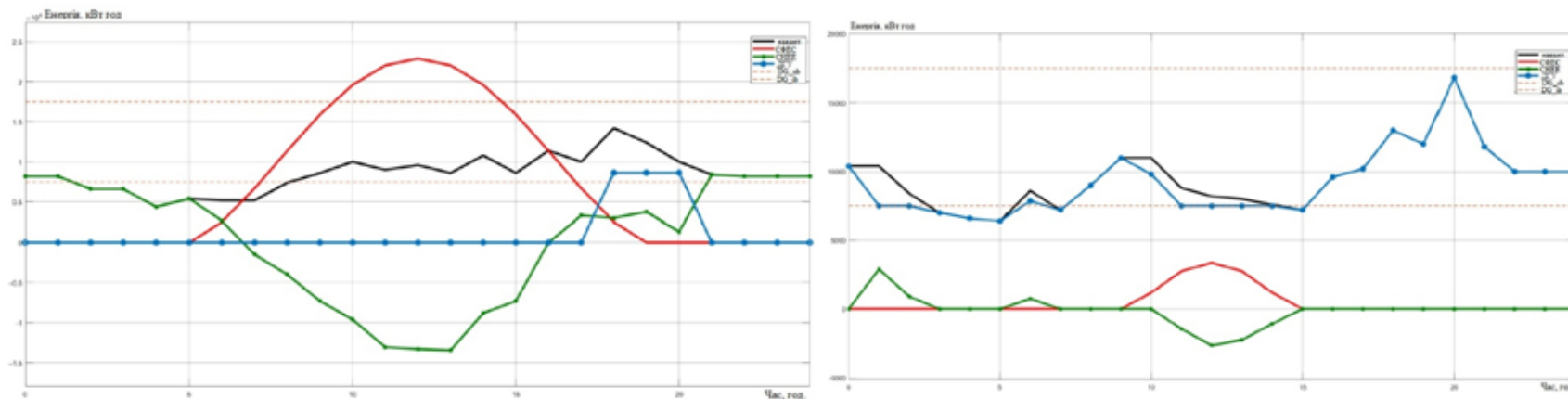


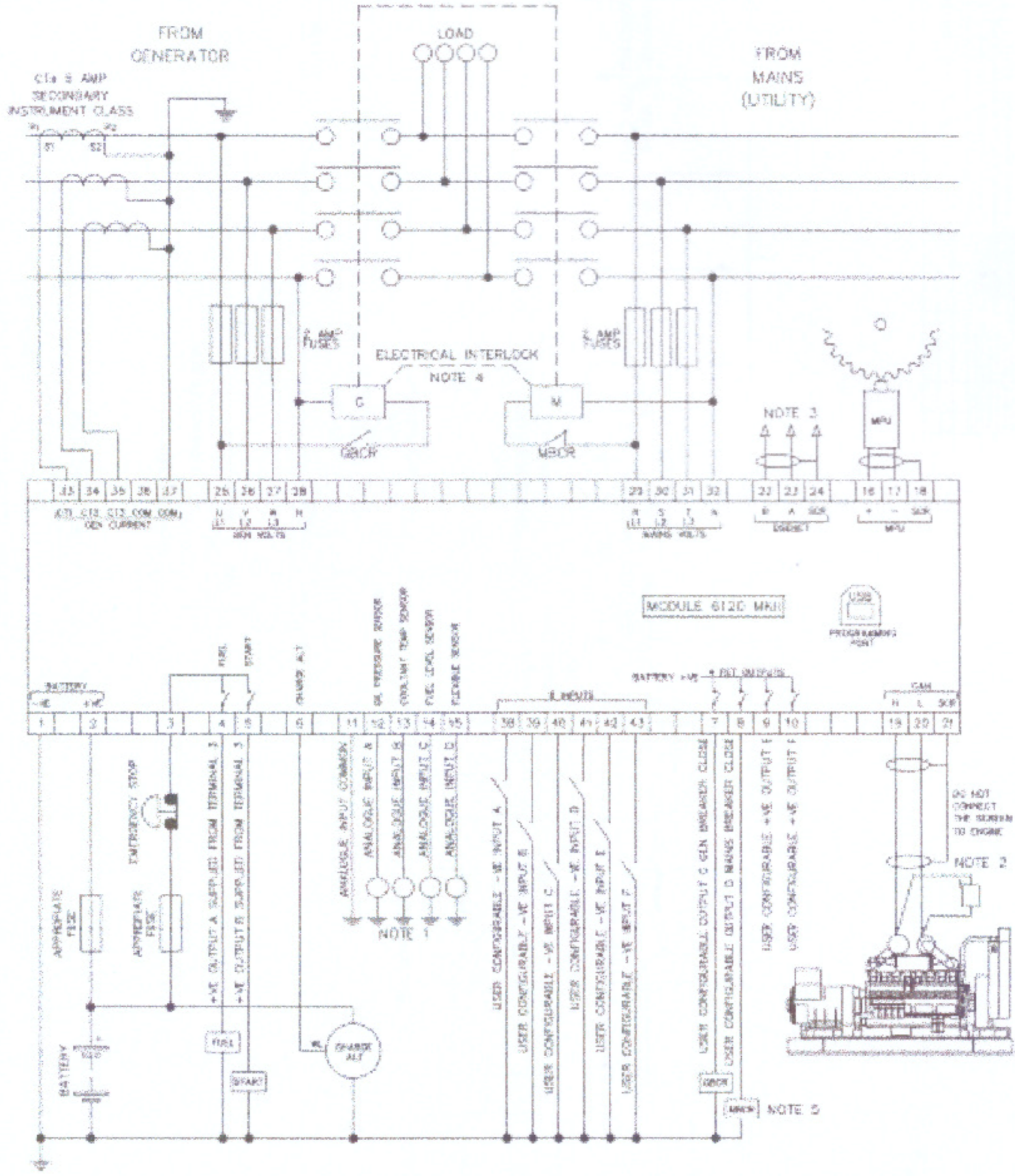
Рисунок 18 – Модель автономної СЕП в MATLAB Simulink



## **ВИСНОВКИ**

1. Розглянуті особливості застосування відновлюваних джерел електричної енергії, сучасні тенденції їх розвитку та концепції, а також вимоги, які пред'являються до комбінованих систем автономного електропостачання.
2. Обгрунтовано розробку структури КАСЕП. Розраховано потужності системи комбінованої системи автономного електропостачання на основі відновлювальних джерел енергії, визначено характеристики основних елементів системи КАСЕП.
3. Здійснено вибір та розрахунок елементів комбінованої автономної системи електропостачання, а саме: тип генератора ВЕУ, елементи фотогальванічної електростанції, проміжного накопичувача енергії, контролера заряду та інверторів СФЕС.
4. Розроблено схеми електричні структурні та принципові комбінованого автономного електротехнічного комплексу та блок-схему алгоритму оптимізації режимів його роботи. Система будується за модульним принципом з підключенням окремих генеруючих установок через індивідуальні силові перетворювачі.
5. Методом комп'ютерного моделювання досліджено динамічні характеристики системи КАСЕП. Запропоновано модель фотоелектричного модуля, що дозволяє отримати вольтамперну та потужну характеристику за даними його технічної специфікації, модель системи накопичення електричної енергії з можливістю введення технічних параметрів через діалогове вікно.
6. Виконано техніко-економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електропостачання.
7. Визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.





|        |              |        |               |
|--------|--------------|--------|---------------|
| № док. | На зам. інд. | Інд. № | Шдано та дата |
| № док. | На зам. інд. | Інд. № | Шдано та дата |

|           |      |                    |                    |       |
|-----------|------|--------------------|--------------------|-------|
| Зм.       | Арк. | № докум.           | Підп.              | Дата  |
| Розробив  |      | Щербина Р.В.       | <i>[Signature]</i> | 21.11 |
| Перевірів |      | Паянок О.А.        | <i>[Signature]</i> | 21.11 |
| Г. контр. |      |                    |                    |       |
| Реценз.   |      | <i>[Signature]</i> | <i>[Signature]</i> | 14.12 |
| Н.контр.  |      | Паянок О.А.        | <i>[Signature]</i> | 28.11 |
| Затв.     |      | Мошноріз М.М.      | <i>[Signature]</i> | 28.11 |

08-24.БДР.018.00.000 ЕЗ

Підвищення ефективності комбінованих автономних систем електропостачання на базі електроустановок з відновлюваними джерелами енергії. Схема електрична принципова підключення МК DSE 6120

|         |         |         |
|---------|---------|---------|
| Літера  | Маса    | Масштаб |
| y       |         |         |
| Аркуш 1 | Аркушів |         |

ВНТУ, гр. ЕПА-22м



## ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Підвищення ефективності комбінованих автономних систем електропостачання на базі електроустановок з відновлюваними джерелами енергії

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-22м

Науковий керівник: к.т.н., доц. Паянок О.А.  
(прізвище, ініціали, посада)

### Показники звіту подібності Unichesk

|                |       |
|----------------|-------|
| Оригінальність | 92,5% |
| Схожість       | 7,5%  |

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.

Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в  ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку

  
(підпис)

Паянок О.А.  
(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи

  
(підпис)

Щербина Р.В.  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Паянок О.А.  
(прізвище, ініціали)