

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ
(інститут)
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ
(факультет)
Кафедра ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеню **магістра**
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Шалагіна Сергія Павловича
(ПІБ)

академічної групи 141М-21-1
(шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка
(код і назва спеціальності)

за освітньо-професійною програмою Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(офіційна назва)

на тему Управління роботою системи електропостачання підприємства з ВДЕ
(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Кошеленко Є.В.			
розділів:				
1 розділ	Кошеленко Є.В.			
2 розділ	Кошеленко Є.В.			
3 розділ	Кошеленко Є.В.			
4 розділ	Тимошенко Л.В.			

Рецензент				
Нормоконтролер	Олішевський Г.С.			

Дніпро 2022

ЗАТВЕРДЖЕНО:завідувач кафедри
електроенергетики

(повна назва)

Папаїка Ю.А
(підпис) (прізвище, ініціали)
«___» _____ 2022 року**ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеню магістра**студенту Шалагіну С.П. академічної групи 141М-21-1
спеціальності 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
за освітньо-професійною програмою Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(офіційна назва)

на тему Управління роботою системи електропостачання підприємства з
ВДЕ

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від ___ №

Розділ	Зміст	Термін виконання
Вступ	Актуальність теми	
1-й	Огляд існуючих систем керування розподілом джерел енергозабезпечення з застосуванням ВДЕ	
2 -й	Вдосконалення систем керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства	
3 -й	Дослідження розробленої системи керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства	
4-й		

Завдання видано _____ Кошеленко Є.В.
(підпис керівника) (прізвище, ініціали)

Дата видачі _____

Дата подання до екзаменаційної комісії _____

Прийнято до виконання _____ Шалагін С.П.
(підпис студента) (прізвище, ініціал)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 102 с, 51 рис, 6 табл., 1 додаток, 23 джерела.

ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, СОНЯЧНА ЕНЕРГІЯ, ВІТРОВА ЕНЕРГІЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

Об'єкт розроблення – система розподілу джерел енергозабезпечення підприємства.

Мета роботи: розробка системи керування розподілом енергії в системах з застосуванням відновлювальних джерел енергії.

Результати та їх новизна полягає у вдосконаленні існуючих автоматизованих систем керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства.

Взаємозв'язок з іншими роботами – продовження інноваційної діяльності з розроблення систем розподілу джерел енергозабезпечення підприємств.

Сфера застосування розробки – системи енергозабезпечення.

Практична значимість кваліфікаційної роботи - розроблену математичну модель оптимального розподілу джерел енергозабезпечення підприємства можна застосовувати на практиці при проектуванні автоматичних систем керування.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛОМ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ЗАСТОСУВАННЯМ ВДЕ	8
1.1 ВДЕ та переваги їх застосування	8
1.2 Актуальність керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства	17
1.3 Огляд існуючих аналогів систем керування розподілом джерел енергозабезпечення	21
1.4 Висновки до розділу 1	42
2 ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛОМ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДПРИЄМСТВА	44
2.1 Розробка структурної схеми системи керування розподілом джерел енергозабезпечення	44
2.2 Розробка функціональної схеми системи керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства	49
2.3 Вибір елементів системи керування	52
2.4 Математична модель системи керування розподілом джерел енергозабезпечення	66
2.5 Висновки до розділу 2	75
3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛОМ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДПРИЄМСТВА	76
3.1 Вибір та обґрунтування середовища моделювання	76
3.2 Моделювання і аналіз отриманих результатів. Порівняння з існуючими рішеннями та економічна доцільність запропонованого рішення	82
3.3 Висновки до розділу 3	91
ВИСНОВКИ	92
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	94
ДОДАТОК А. ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	97

ВСТУП

Актуальність теми. Розподілене виробництво (РВ) або розподілена генерація (РГ) електроенергії ефективно поєднує технологічні досягнення, вводячи нові компоненти енергосистеми, покращене управління, відновлювані джерела, простий зв'язок та веб-технології, відкриваючи шлях для так званих інтелектуальних мереж. Технологія розподіленої генерації знаходиться на перетині енергосистем, силової електроніки, техніки управління, відновлюваних джерел енергії та систем зв'язку, які не є взаємовиключними. Ключові особливості інтеграції відновлюваних джерел енергії у розподільчу мережу включають мінімізацію втрат, стабільність напруги, покращення якості електроенергії та низьку вартість споживання, зумовлену багатими природними ресурсами, такими як сонячна або вітрова енергія.

Виникаюча в усьому світі тенденція дерегулювання ринку електроенергії послужила основою помітного прогресу в парадигмі розподіленої чи розосередженої генерації з допомогою використання невеликих фотоелектричних чи вітряних електростанцій та усунення неминучих недоліків, як-от відключення електроенергії, низька якість, регулювання напруги та збільшення втрат компонентів у комерційній та побутовій інфраструктурі. Ці невеликі електростанції, встановлені на станціях, не тільки забезпечують якісніші послуги споживачам як резервні джерела, але також усувають забруднення, викиди парникових газів та глобальне потепління.

Застосування вітрових та сонячних електростанцій потужністю від декількох кВт до МВт в даний час є частиною розподілених енергоресурсів, які включають реагуючі навантаження і накопичення енергії. Це також знижує потребу у розширенні розподілу та передачі з урахуванням основних вимог величезних електростанцій. Найбільш приваблива перспектива полягає в

тому, що ВДЕ встановлюється навколо мережі, яка знаходиться близько до сторони споживача, щоб мінімізувати втрати потужності та падіння напруги.

Впровадження РГ з використанням відновлюваних джерел енергії вигідно для стабілізації енергосистеми та забезпечення надійності при зниженні витрат на генерацію та розподіл. Щоб повністю використати потенціалу РГ, потрібна надійна система керування.

Метою написання роботи є розробка системи керування розподілом енергії в системах з застосуванням відновлювальних джерел енергії.

Задачі дослідження:

1. Виконати огляд літератури з теми дослідження. Розглянути сучасні системи керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства;
2. Розглянути вдосконалення систем керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства;
3. Навести дослідження розробленої системи керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства.

Об'єкт дослідження - розподіл джерел енергозабезпечення підприємства.

Предмет дослідження - автоматична система керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства.

Методи дослідження: аналізу, порівняння, статистики, дослідження, імітаційного моделювання, проектування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у вдосконаленні існуючих автоматизованих систем керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства.

Практичне значення одержаних результатів: розроблену математичну модель оптимального розподілу джерел енергозабезпечення підприємства можна застосовувати на практиці при проектуванні автоматичних систем керування.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛОМ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ЗАСТОСУВАННЯМ ВДЕ

1.1 ВДЕ та переваги їх застосування

Зростання енергоспоживання є характерною рисою сучасного людства. До недавнього часу розвиток енергетики не зустрічав принципових труднощів, оскільки збільшення виробництва енергії відбувалося в основному за рахунок збільшення видобутку корисних копалин (природний газ, нафта, вугілля), досить зручних в споживанні. До теперішнього часу більше 75% електроенергії виробляється за рахунок спалювання мінерального і органічного палива.

Однак енергетика вже сьогодні зіткнулася з виснаженням своєї традиційної сировинної бази в силу обмеженості копалин енергетичних ресурсів. Крім того, нафта, газ і вугілля є цінною сировиною для хімічної промисловості.

Зберігати високі темпи розвитку енергетики шляхом використання лише традиційних викопних джерел енергії стає все важче. Забруднення навколишнього середовища продуктами згоряння і переробки викопних джерел енергії, головним чином вугілля та ядерного палива, є причиною погіршення екологічної ситуації на Землі. Уже при сучасних масштабах виробництва енергії можливі незворотні небезпечні зміни клімату.

Подібними обставинами визначається зростаючий інтерес до поновлюваних джерел енергії, широке використання яких в майбутньому не призведе до порушення екологічного балансу Землі.

Саме тому підприємства прагнуть перейти до застосування альтернативних джерел енергії задля підвищення енергоефективності [1].

Розвиток і використання відновлювальних джерел енергії, в тому числі і вітрових, є одним з інструментів протидії змінам клімату, які в іншому

випадку торкнуться всіх за прогнозами вчених в недалекому майбутньому. Україна це явище не обійде, адже вже сьогодні спостерігаються зміни в звичних підходах сільськогосподарського виробництва, спричинені нестабільністю погодних патернів, які також можуть викликати ризики в галузі харчової безпеки.

Крім цього, додатковим аргументом на користь ВДЕ є той факт, що міжнародний імідж України безпосередньо пов'язаний з виконанням ним своїх міжнародних зобов'язань, в тому числі в частині зменшення викидів і забруднення навколишнього середовища.

Таким чином, розвиток відновлювальних, в тому числі вітрових і сонячних джерел енергії, є позитивним фактором при дослідженні виробництва електроенергії.

Очевидно, що завдяки використанню альтернативних джерел енергії та правильному розподіленні джерел енергії можна зменшити витрати підприємства на електроенергію.

Енергія вітру - це перетворення вітрової енергії в корисний вид енергії за допомогою вітряних турбін, вітрових насосів або вітрил.

Люди застосовують енергію вітру протягом не менше 5500 років. Спочатку її застосовували в мореплаванні і для вентиляції будівель. Перші вітряні млини почали застосовувати в 7 в. н.е. для зрошення і створення борошна в Афганістані, Ірані та Пакистані.

Поява водяних насосів стало можливим завдяки поширенню по всьому світу залізничного транспорту (парових локомотивів), для якого і здійснювали відкачку води з свердловин.

Сьогодні енергія вітру розглядається як альтернатива горючих корисних копалин завдяки тому, що вона є поширеною (рисунок 1.1), відновлювальною, чистою і не створює парникових газів.

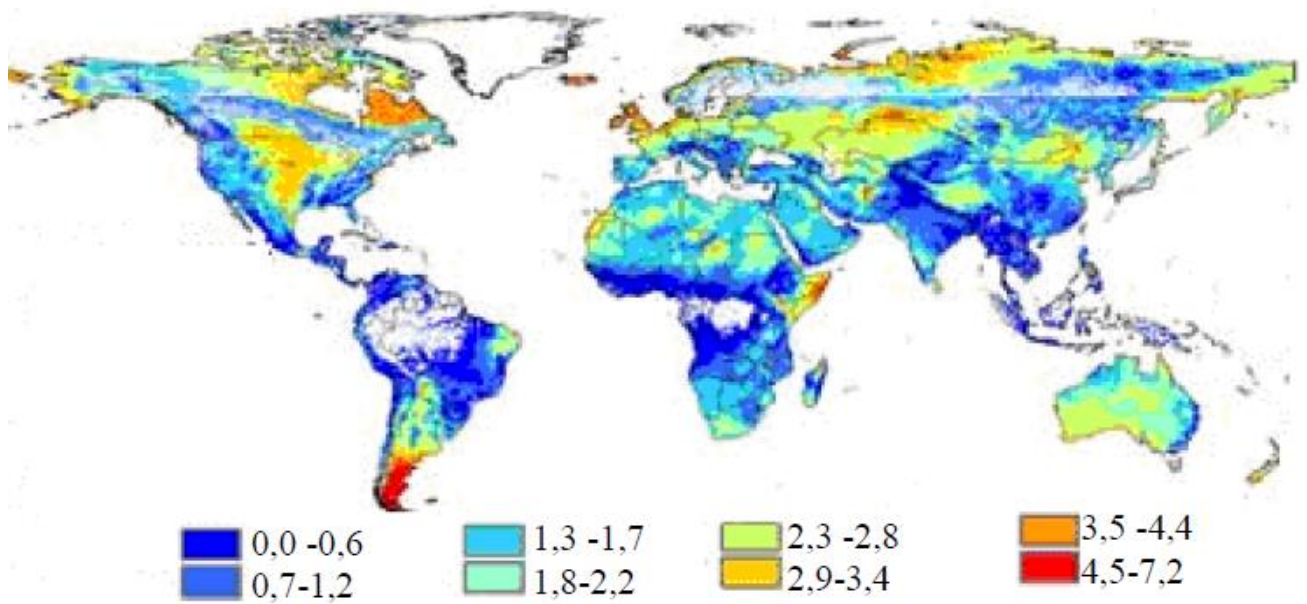


Рисунок 1.1 – Світовий потенціал вітру [1]

Використання вітрової енергетики в світі зростає рекордними темпами, і, згідно з прийнятою в Євросоюзі програми, до 2030 року частка електроенергії, виробленої з відновлюваних джерел, повинна скласти не менше 30%. Що стосується України, то 1 жовтня 2014 року Кабмін також затвердив Національний план дій з розвитку відновлюваної енергетики.

Документ, в тому числі, передбачає, що через п'ять років поновлюваними джерелами енергії в Україні має вироблятися не менше 11% електроенергії. Але цієї мети не було досягнуто.

Згідно скоригованої «Енергетичної стратегії України на період до 2030 г.» в нашій країні в 2030 р повинно вироблятися не менше 30% від всієї електроенергії з поновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонце, вітер, води річок та ін.

Україна володіє значними ресурсами вітрової енергії і завдяки своїм природно-кліматичним характеристикам може вийти на одне з провідних місць в світі по використанню енергії вітру. Це показує актуальність застосування вітрової енергії для енергозабезпечення підприємств.

Кожна країна встановлює свої норми та вимоги до ВЕС. Документи, які регламентують вимоги до ВЕС деяких зарубіжних країн, представлені у вигляді рисунка 1.2.



Рисунок 1.2 – Основні документи, які регламентують вимоги до ВЕС

У багатьох світових нормативних документах вказано, що ВЕС повинна бути в змозі автоматично регулювати напругу в електричній мережі [2].

Оскільки неможливо виконати одночасно регулювання напруги і $\cos \phi$, відхилення обох уставок вирішуються, використовуючи коефіцієнт, який називається «коефіцієнтом статизму», або просто «статизм».

Всі ВЕС повинні включатися в регулювання U / Q енергосистеми тим же чином, що і традиційні електростанції. Координація регулювання напруги здійснюється операторами систем розподілу і передачі електричної енергії в мережі загального призначення.

На рисунку 1.3 представлено регулювання напруги за допомогою коефіцієнта статизму.

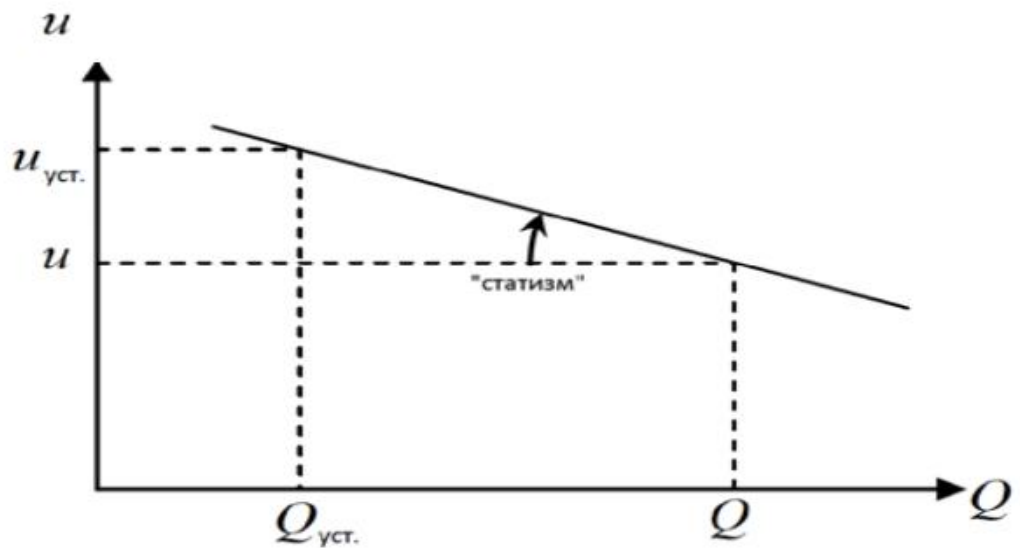


Рисунок 1.3 – Регулювання напруги за допомогою коефіцієнта статизму [2]

На рисунку 1.4 представлені характеристики роботи станційного регулятора.

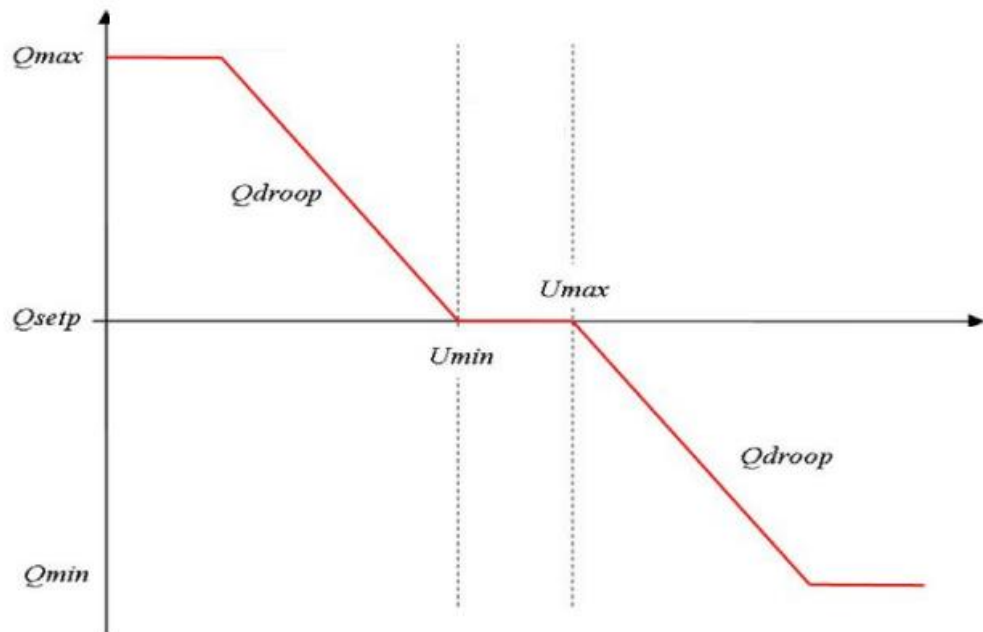


Рисунок 1.4 – Характеристики роботи станційного регулятора при регулюванні напруги з урахуванням «статизму» і «зоною нечутливості» [2]

Приклад регулювання напруги представлений на рисунку 1.5.

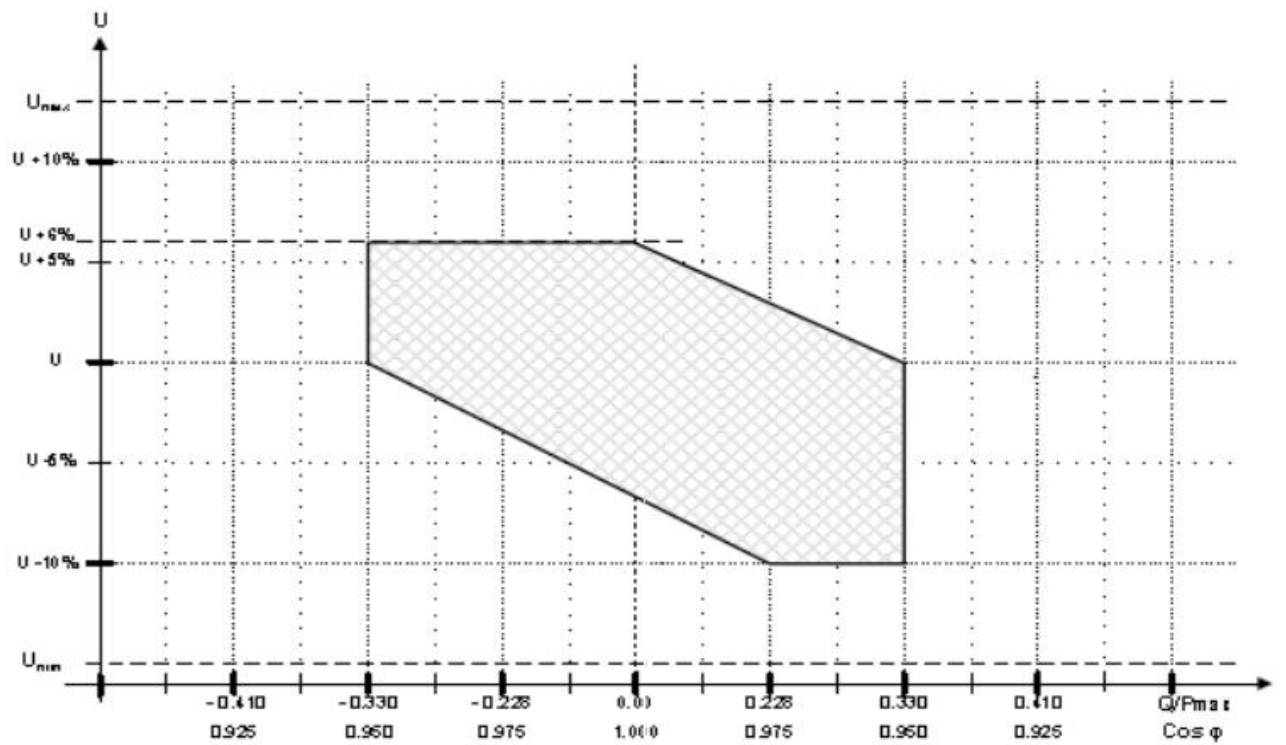


Рисунок 1.5 – Приклад регулювання напруги [2]

В деяких документах представлені приклади моделі ВЕС у складі ЕС (рисунок 1.6).

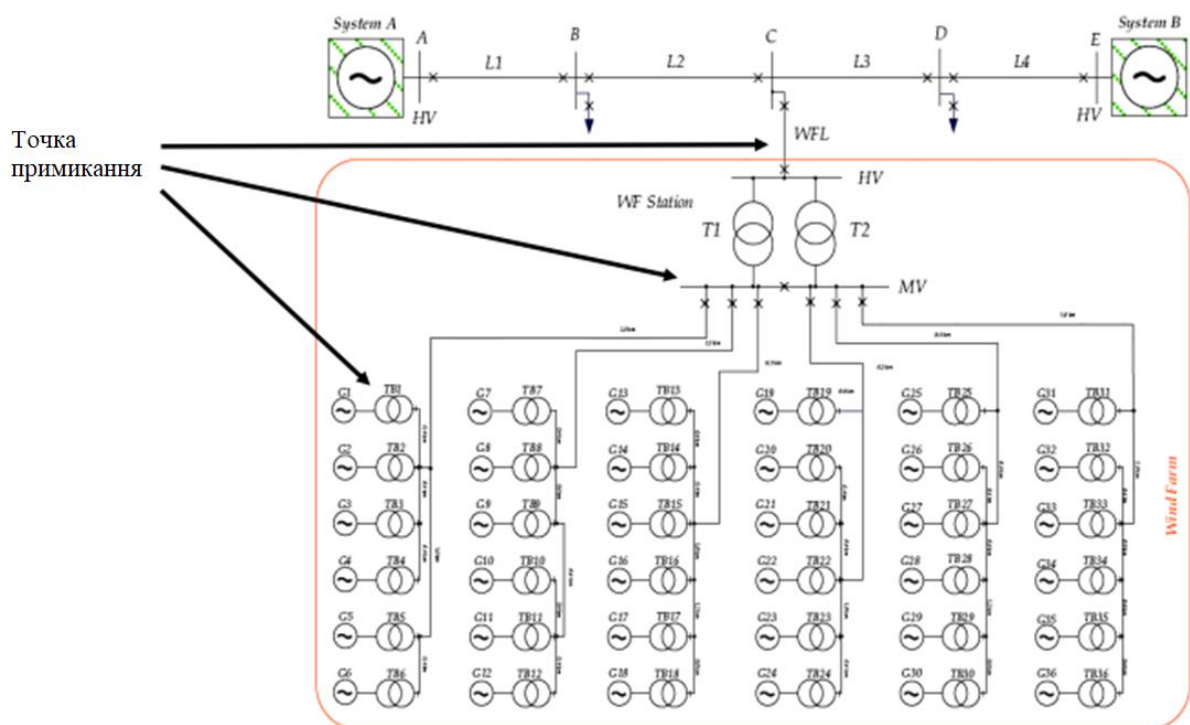


Рисунок 1.6 – Приклад моделі ВЕС в складі ЕС [2]

Вимоги до стійкості ВЕС при провалах напруги в Канаді, Індії, Китаї
можемо представити у вигляді рисунка 1.7 [3].

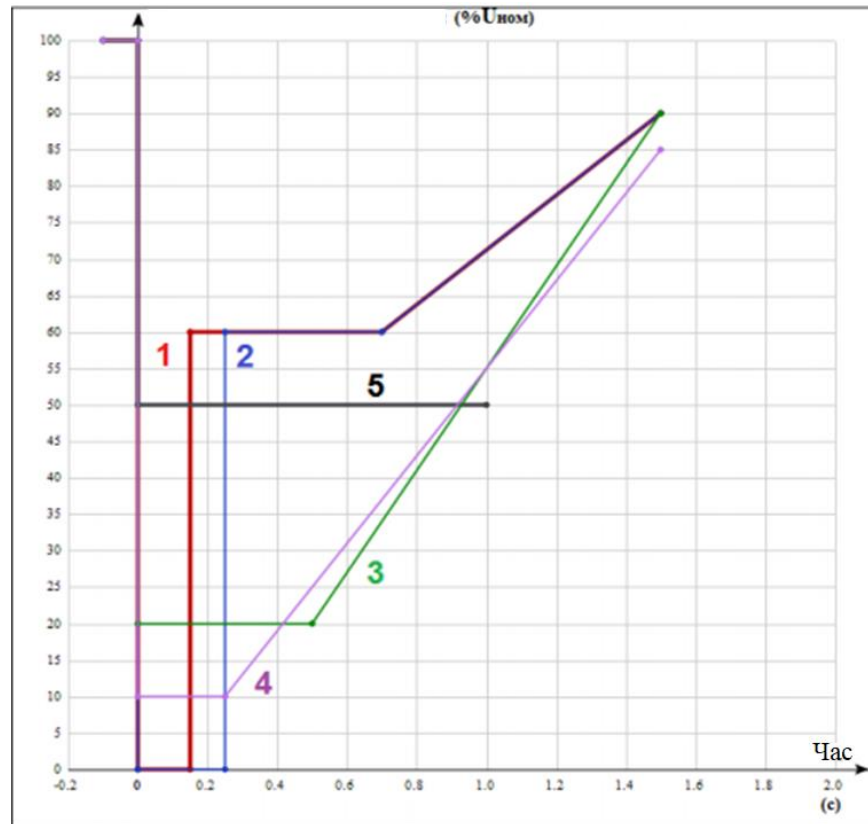


Рисунок 1.7 – Вимоги до стійкості при провалах напруги [3]

Вимоги до участі в регулюванні частоти представлені на рисунку 1.8.

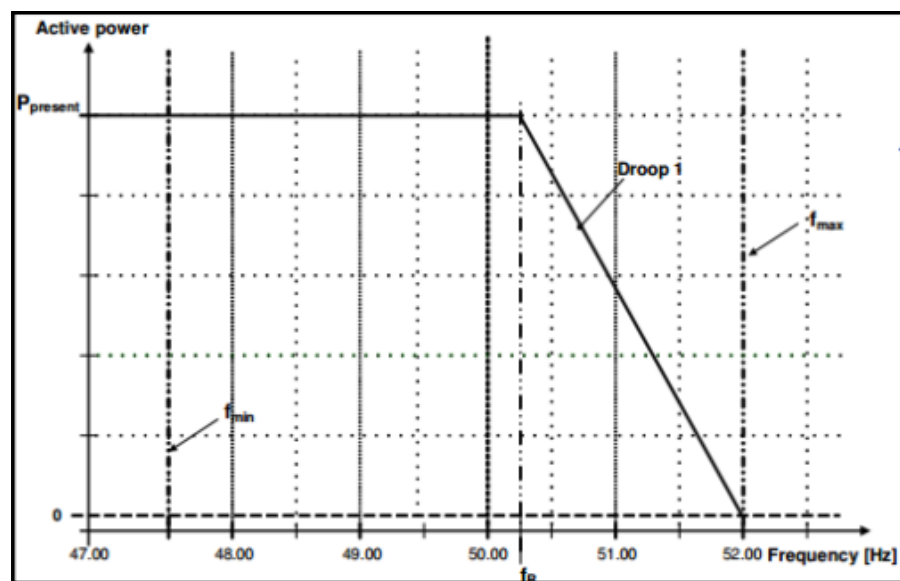


Рисунок 1.8 – Вимоги до участі в регулюванні частоти [3]

Всі налаштування задаються за діючим значенням. Джерело енергозабезпечення повинно бути відключене або зупинене, якщо вимірні значення виходять за границі допустимих значень.

Також актуально застосовувати енергію сонця. Повна середня потужність сонячного випромінювання на Землю становить $1,2 \cdot 10^{17}$ Вт, тобто на одну людину припадає близько 30 МВт [4].

Потужність сонячного випромінювання залежить від широти місцевості, пори року і доби. Крім того, потужність сонячного випромінювання практично досягає поверхні Землі (тобто за виключенням втрат у атмосфері), залежить також і від стану атмосфери (наявності хмар, туману, пилу тощо). Так як стан атмосфери залежить від багатьох випадкових чинників, то добові і річні графіки надходження сонячної енергії мають складний характер.

Сумарна сонячна радіація E_{Σ} включає в себе випромінювання, що падає на горизонтальну земну поверхню, двох видів: пряме і дифузне [7]:

$$E_{\text{сумм}} = E_p + E_{\text{пр}} \sin \alpha,$$

де $E_{\text{пр}}$ – пряме сонячне випромінювання (являє собою потік випромінювання, що надходить від сонячного диска і вимірюється в площині, перпендикулярній сонячним променям);

E_p – дифузне випромінювання (надходить на Землю від іншої частини небесної півсфери, розсіюючись при проходженні через атмосферу);

α – висота Сонця – кут у вертикальній площині (кут підйому над горизонтом).

Знати висоту сонця дуже важливо. При великій висоті Сонця збільшується число світлових годин, під час яких можна акумулювати сонячну енергію, в тому числі і для забезпечення енергетикою підприємства.

Кількість сонячної радіації в різних місцевостях України сильно залежить від їх географічних характеристик, клімату (і навіть мікроклімату) і важко прогнозованих факторів.

Важливою характеристикою радіаційного режиму є також тривалість сонячного сяння. У залежності від сезонних особливостей добового ходу хмарності в тому чи іншому районі регіону періоди з безперечною тривалістю сонячного сьйва можуть відноситися до різних частин дня. Остання обставина має важливе значення для оцінки надходження сонячної радіації до прийомних поверхонь, оскільки найбільша інтенсивність її спостерігається в обідню пору. Тому важливо, щоб саме на цей час припадала максимальна повторюваність сонячного сьйва.

Найважливішу роль в ефективній роботі геліоустановки грає так само оптимальна орієнтація приймача сонячної енергії, яка визначається трьома основними кутами – широтою місця розташування приймача φ , годинниковим кутом ω , схиленням Сонця δ (рисунок 1.9).

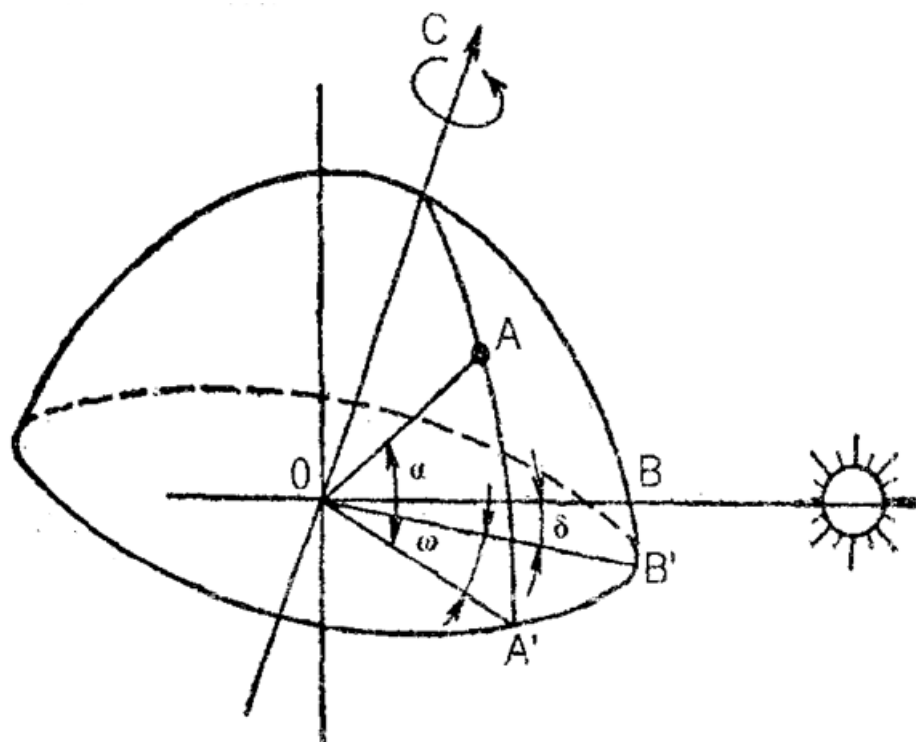


Рисунок 1.9 – Схема уявного руху Сонця по небу [4]

Карта розповсюдження сонячної енергії на поверхні Землі наведена на рисунку 1.10.

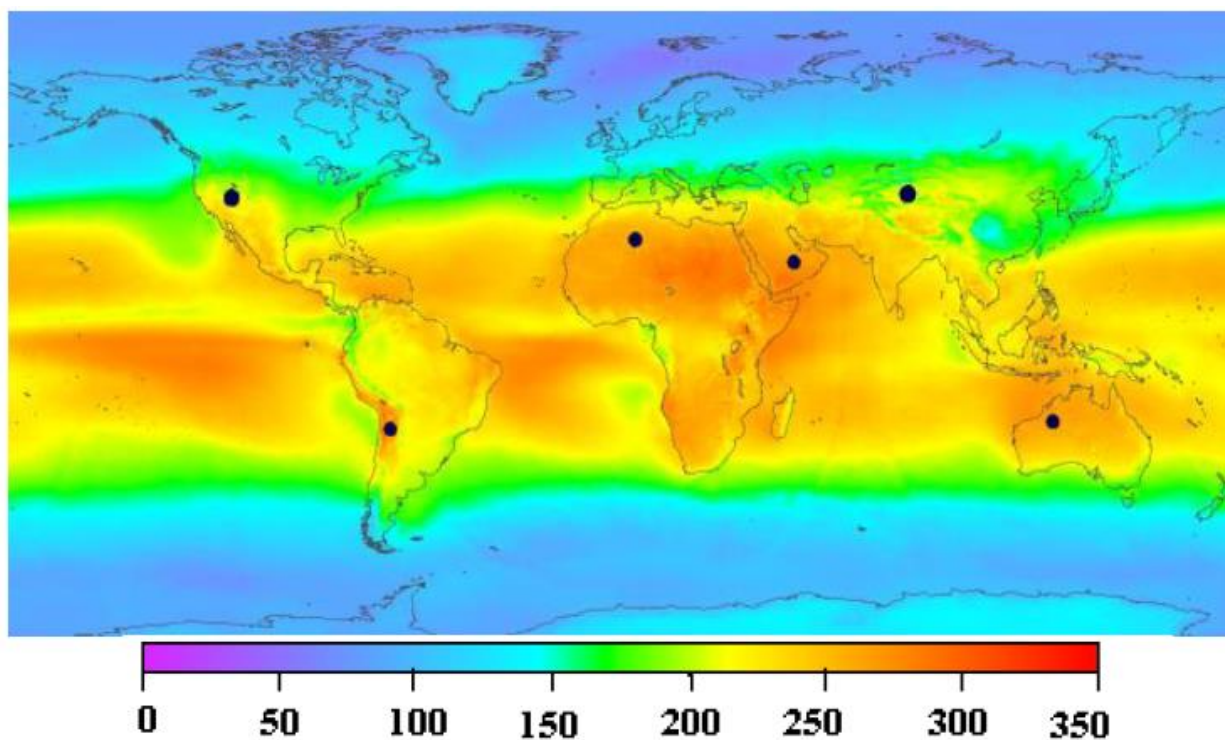


Рисунок 1.10 – Карта розповсюдження сонячної енергії на поверхні Землі [4]

Все вищенаведене доводить актуальність застосування ВДЕ для енергозабезпечення.

1.2 Актуальність керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства

Актуальним є використання ВДЕ для підприємств зі змінним графіком навантаження, як додаткові генеруючі потужності.

Основним в таких системах буде живлення від мережі, інші елементи будуть виконувати допоміжну функцію при необхідності.

Приклад такої системи енергозабезпечення наведений на рисунку 1.11.

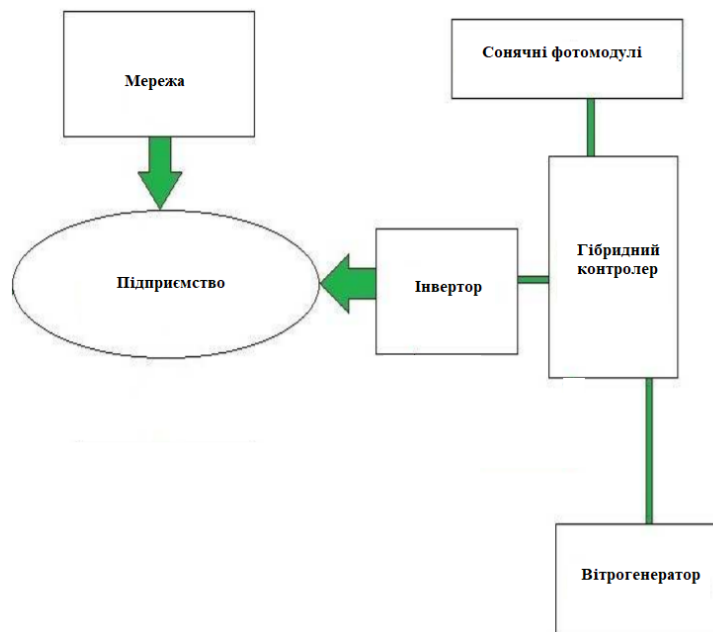


Рисунок 1.11 – Приклад системи енергозабезпечення з застосуванням ВДЕ

Призначення елементів схеми:

- 1) Сонячні фотомодулі – додаткове джерело енергії, підвищує надійність системи;
- 2) Вітрогенератор - виробляє тим більше енергії, чим вище швидкість вітру (від 3 м/с);
- 3) Гібридний контролер – передає заряд на акумулятори та зупиняє систему при надлишку енергії;
- 4) Інвертор - перетворює постійний струм на змінний.

Крім цього, можуть бути встановлені:

- 5) Акумуляторна батарея (Li-ion, Li-Polymer) – запасає електроенергію та за необхідності вкидає її в мережу.
- 6) Газотурбінна установка. Газотурбінна установка може гнучко реагувати на зміни в енергії вітрі та Сонце, згладжуючи коливання у виробленні електрики від цих джерел. Газотурбінна установка здатна буде змінювати потужність, що виробляється, зберігаючи високий ККД навіть при частковому навантаженні. Відмінні властивості в тому, що в газотурбінній

електростанції можна знижувати потужність без значної шкоди їм. По мірі необхідності газотурбінна електростанція працюватиме на повну потужність.

Ці властивості дозволяють підприємству брати менше електроенергії з мережі, вирівнювати напругу, підвищують надійність, накопичувати енергію в період її низької вартості та видавати електроенергію у період високої вартості.

Таким чином, застосування ВДЕ в системах енергозабезпечення підприємства є актуальним.

Крім цього, постає питання в керуванні розподілом джерел енергозабезпечення задля зменшення витрат на електроенергію [5,6].

Виконаємо постановку задачі оптимізації вартості закупки електроенергії з використанням ВДЕ.

Для підприємства відомий графік енергоспоживання, який описується періодичною функцією $D(t)$ з періодом T , що дорівнює одній добі, та графік зміни тарифу протягом доби, що описується функцією $c_e(t)$. Нехай підприємство має можливість накопичення електроенергії в акумуляторах. Потрібно визначити добовий графік закупівлі електроенергії, що забезпечує мінімальні сумарні витрати та необхідний обсяг накопичувачів [5].

При цьому вважається, що витрати на купівлю електроенергії C_p обчислюються як добуток обсягу закупленої електроенергії та поточної вартості згідно з тарифом, а витрати на зберігання електроенергії C_s визначаються лише амортизаційними відрахуваннями на придбання накопичувачів за умови, що його вартість пропорційна до обсягу.

Сумарні витрати $C_{\text{сум}}$ - це сума витрат на закупівлю електроенергії з енергомережі та на зберігання електроенергії в накопичувачах та визначається за формулою:

$$C_{\text{сум}} = C_p + C_s.$$

Виходячи із постановки завдання, витрати на зберігання електроенергії можуть бути розраховані залежністю:

$$C_S = a_{bd}(X(t)),$$

де a_{bd} – добова амортизація накопичувачів у розрахунку на 1 кВт·год:

$$X(t) = \int_0^t (P(\tau) - D(\tau))d\tau + X_0, \quad (1.1)$$

де $P(\tau)$ і $D(\tau)$ – кількість електроенергії, що купується і споживається за одиницю часу;

X_0 – необхідний залишок на початок розрахункового періоду, що визначається з умови $X(t) > 0$.

Витрати на закупівлю електроенергії за період $(0,t)$ можуть бути обчислені як:

$$C_p = \int_0^t P(\tau)c_e(\tau)d\tau.$$

Таким чином, необхідно вирішити оптимізаційну задачу:

$$P(\tau) \rightarrow \min : C_{\text{сум}}(P(t)) \rightarrow \min. \quad (1.2)$$

При цьому обсяг накопичувачів можна розрахувати за формулою (1.1). Для функції споживання можна записати дві умови:

$$\int_0^t P(t)dt = \int_0^t D(t)dt. \quad (1.3)$$

Умова (1.6) - рівність сумарної закупленої та спожитої електроенергії за добу;

$$P(t) \geq 0.$$

Функція не може набувати негативних значень, оскільки це означало б, що електроенергія «продається» у мережу.

Співвідношення (1.2) і (1.3) нескладно виконати, якщо визначити функцію закупівлі $P(e)$ через масштабування функції $f(t)$, область значень функції як $R(f) \in [0, \gamma]$, де γ - деяка додатна константа, значення якої для зручності обчислень може бути прийнято рівним одиниці [6].

Функцію закупівлі можна записати так:

$$P(t) = \frac{\int_0^T D(\tau) d\tau}{\int_0^T f(\tau) d\tau} f(t).$$

У такому формулюванні завдання зводиться до знаходження функції $f(t)$. Це завдання відноситься до класу некоректно поставлених, і його вирішення буде залежати від форми, в якій його шукатимуть [6].

Пошук величин закупівлі електроенергії на кожному інтервалі є завданням багатокритеріальної оптимізації. Регулювати і оптимізувати функцію закупівлі $P(t)$ з урахуванням ВДЕ можливо завдяки застосуванню систем керування розподілом джерел енергозабезпечення, що доводить актуальність застосування таких систем.

1.3 Огляд існуючих аналогів систем керування розподілом джерел енергозабезпечення

Розглянемо принцип роботи систем керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства на прикладі функціональної схеми, наведеної на рисунку 1.12 [7].

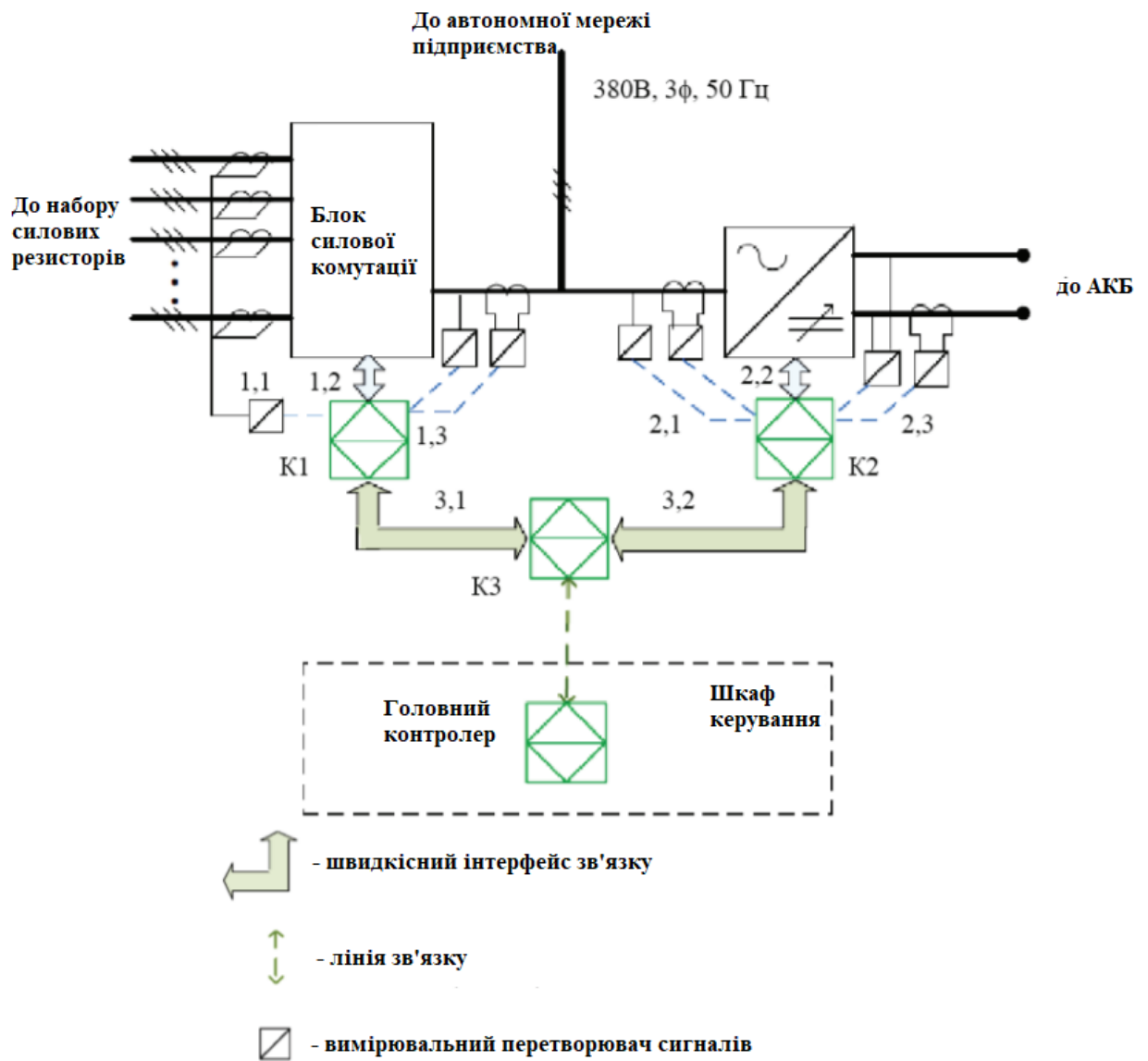


Рисунок 1.12 – Приклад функціональної схеми системи керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства [7]

На рисунку 1.12 представлені наступні позначення: К1 - контролер КБН; К3 - загальний контролер модуля; К2 - контролер ДНПС; 1.1 - контроль струму ступеня; 1.2 - ланцюги контролю та управління внутрішньої силової схеми КБ; 1.4 та 2.1 - контроль та вимірювання вихідних електричних параметрів; 2.2 - ланцюги контролю та управління внутрішньою силовою схемою ДНПС; 2.3 - контроль та вимірювання електричних параметрів на стороні АКБ; ДНПС - двонаправлений перетворювач струму; АКБ - акумуляторна батарея; КБН - кероване баластне навантаження.

Джерела потужності в даній схемі поділяються на дві категорії:

1) провідні джерела енергокомплексу, що задають частоту та напругу електромережі:

- ДГУ (як основне джерело, що задає напругу мережі);
- ДНПС із підключеними АКБ (у режимі роботи автономного інвертора);

2) ведені джерела, які підлаштовуються під напругу мережі та генерують потужність у мережу:

- ВЕУ;
- СФЕУ.

Дизель-генераторна установка (ІЗ) є основним провідним джерелом потужності та гарантованим джерелом видачі потужності в тривалому режимі (за наявності відповідного запасу палива). Дизель-генераторна установка в системі динамічного регулювання не розглядається як об'єкт активного управління, оскільки має власну замкнуту систему динамічного регулювання з метою підтримки заданої напруги та частоти генератора. Контролери здійснюють автоматичний запуск/зупинку ДГУ шляхом дистанційного керування за протоколом Modbus, Modbus TCP або дискретними релейними сигналами. У випадку, якщо сума потужностей від джерел І1 та І2, усереднена за період Т, перевищує загальну споживану потужність, при досягненні максимуму використання енергії ВДЕ (як наслідок, максимальної економії дизельного палива), завдяки роботі системи керування існує можливість відключення всіх установок енергокомплексу.

У цьому випадку провідним джерелом стає ДНПС, який переходить у режим автономного інвертора та формує напругу мережі.

Загальна споживана потужність підприємства визначається як:

$$P_{\text{сп}}(T) = P_{\text{пр}}(T) + P_{\text{вт}}(T) + P_{\text{вн}}(T) + P_{\text{КБН}}(T).$$

де $P_{\text{сп}}(T)$ – загальна споживана потужність, усереднена за період Т;

$P_{пр}(T)$ – потужність, що споживається пріоритетними навантаженнями, усереднена за період T ;

$P_{вт}(T)$ – потужність, споживана вторинними навантаженнями, усереднена за період T ;

$P_{вн}(T)$ – потужність споживання системи власних потреб енергокомплексу, усереднена за період T ;

$P_{кбн}(T)$ – максимальна потужність, яка може бути встановлена системою управління за період T для КБН.

Система управління відключає ДГУ і переходить на ДНПС як на провідне джерело згідно умови:

$$P_{ВДЕ}(T) > P_{сп}(T) + P_{КБ},$$

де $P_{ВДЕ}(T)$ – сумарна електрична потужність, що генерується в мережу від усіх джерел потужності на базі ВДЕ (сума потужностей $I1$ та $I2$), усереднена за період T ;

$P_{КБ}$ – коридор безпеки за потужністю, постійна величина, що встановлюється персоналом або обчислюється алгоритмами прогнозу [7].

Також в даній системі можна передбачити оптимізацію згідно з (1.5).

У цьому режимі передбачається робота ДНПС із зовнішньою АКБ у режимі циклічного заряду/розряду АКБ із заданою глибиною циклічного розряду $\Delta W_{цр_акб}$ (кВт·год).

Для розуміння принципу функціонування ДНПС важливо знати, що ДНПС як провідне джерело енергії створює напругу (із заданою амплітудою та частотою) мережі (при відключеному ДГУ) також і в період заряду АКБ (при відборі потужності із мережі).

Таким чином, ДНПС з АКБ створює напругу мережі безперервно у всіх перерахованих режимах: під час заряду АКБ, при переході АКБ з режиму заряду в режим розряду, під час розряду АКБ і при переході АКБ з режиму розряду в режим заряду. Цей підхід забезпечує можливість використання АКБ

з автономією 5...10 хв при потужності заряду/розряду 10 % від максимальної споживаної потужності в енергокомплексі.

Іншими словами, для функціонування системи енергозабезпечення достатньо застосування АКБ ємністю, порівнянною з номіналом АКБ аварійного електропостачання, але при цьому слід використовувати АКБ із підвищеним числом циклів заряду/розряду [8].

На рисунку 1.13 показано однолінійну схему розподільчої мережі, на якій навантаження та генерація всіх споживачів на кожній фазі моделюються єдиним та навантаженням.

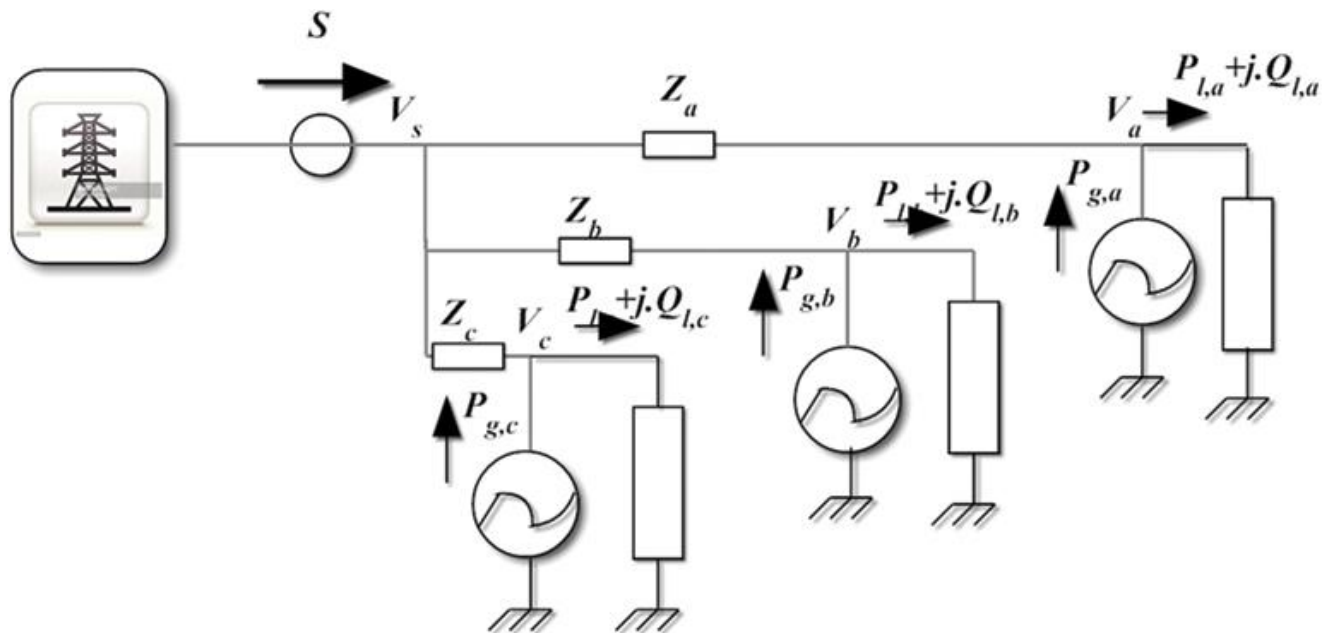


Рисунок 1.13 – Однолінійна схема розподільчої мережі [8]

Незважаючи на режим підключення до мережі, основним призначенням цих ресурсів є зниження витрат на споживання електроенергії. Проте з технічного погляду між цими двома режимами підключення є різниця.

В автономному режимі зазвичай головною метою є - збалансувати генерацію та навантаження, щоб уникнути відключення навантаження, що небажано [8].

Однак у режимі підключення до мережі, оскільки підтримка мережі доступна, дисбаланс може бути допущений певною мірою. Однак значний

дисбаланс між генерацією та навантаженням може спричинити проблеми з якістю електроенергії.

Розподілене керування - це ефективний підхід до управління майбутніми інтелектуальними мережами з розподіленими ресурсами.

У літературі висвітлювалося управління розподіленою енергетичною системою з використанням відновлюваних джерел. Одна з перших робіт була опублікована в 2001 році та стосується інтелектуального управління енергією з урахуванням таких джерел енергії, як фотоелектричні, вітряні та традиційні електростанції, а також оптимізації системи з використанням енергетичних, екологічних та економічних критеріїв [9].

Одним із підходів, використаних у наступні роки, був диспетчерський контроль з урахуванням різних структур для розподілених енергетичних систем: автономна система, що включає джерела енергії вітру та сонця [10], або система, підключена до мережі [11], включаючи вітрові та сонячні джерела енергії де розглядаються кілька стратегій диспетчерського управління.

Запропонована структура управління розподільчою мережею, яка координує декілька джерел енергозабезпечення (ДЕЗ), показано на рисунку 1.14 [10].

Для розподіленого керування кількома ДЕЗ передбачається наявність каналу зв'язку між сусідніми ДЕЗ.

Крім того, існує керуючий агент, званий лідером, який контролює завантаження мережі та ініціює координацію ДЕЗ щоразу, коли це необхідно.

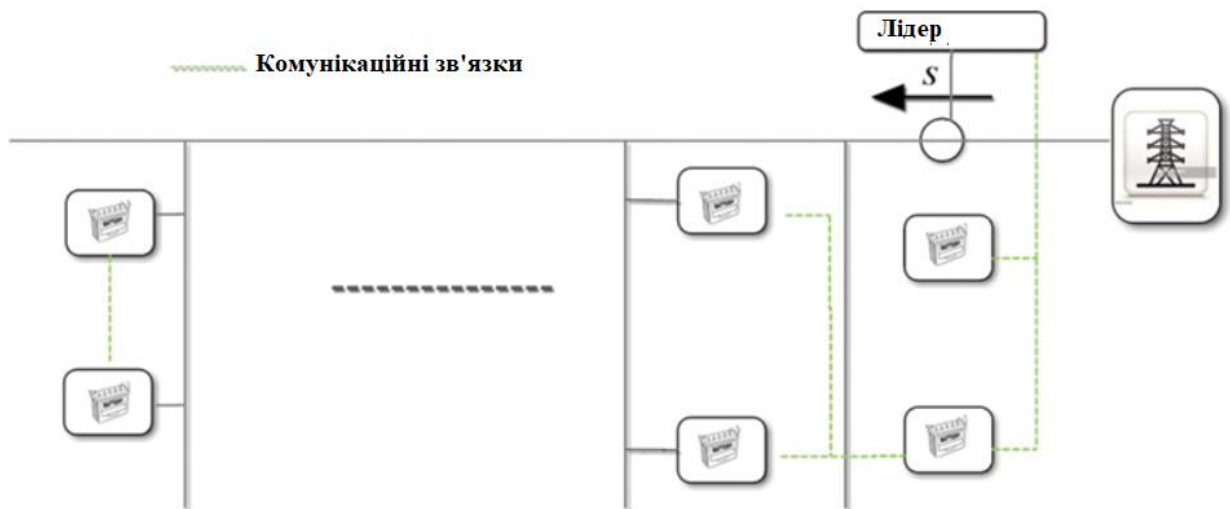


Рисунок 1.14 – Структура управління розподільчою мережею [10]

Щоб координувати ДЗЕ для керування навантаженням, для мережі пропонується розглядати три режими керування роботою. Ці режими керування мережею показані на рисунку 1.15, для якого сформовано чотири обмеження, що визначають режими управління мережею.

Якщо завантаження мережі знаходиться в бажаному діапазоні ($S_d^{gen.}$ і S_d^{cons}), мережа в нормальному стані. Отже, немає потреби у координації ДЗЕ на основі вимог мережі, і вони можуть працювати в нормальному режимі. Якщо завантаження мережі перевищує $S_d^{gen.}$, мережа переходить у режим керування при високому навантаженні. У цьому режимі управління ДЗЕ повинні бути скоординовані для заряджання та зниження навантаження на мережу. Додатково, якщо завантаження мережі менше S_d^{cons} , мережа переходить в режим високого споживання, що означає, що ДЗЕ повинні бути скоординовані для розвантаження та зниження навантаження на мережу.

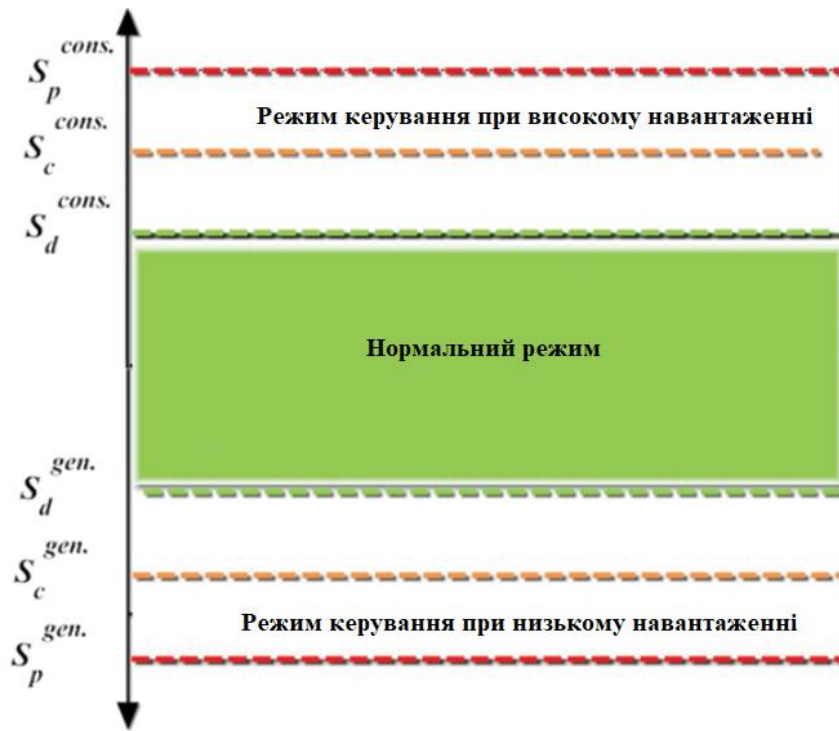


Рисунок 1.15 – Режими керування мережею [10]

Система керування і розподілу за визначенням пов'язана з моніторингом даних у реальному часі. Управління може виконуватися через швидкий двосторонній цифровий зв'язок за допомогою впровадження технологічних рішень в інфраструктуру енергопостачання [11].

Також можлива інтеграція між мікромережами та всередині електроенергетичної компанії, пристроями, що генерують відновлювану енергію, пристроями споживчих навантажень та сторонніми організаціями, такими як споживачі, постачальники чи регулюючі організації.

Ефективне використання ємності зберігання виявилось ефективним рішенням підвищення продуктивності цих розподілених систем, на які сильно впливає випадковість енергії, що забезпечується відновлюваними джерелами. Таким чином, система мікрорітру використовує акумуляторний блок як буфер для періодів високого навантаження, а також для підтримки норм якості електроенергії, а в [12] системи управління енергією мінімізують відключення електроенергії для критичних навантажень, і максимально використовувати відновлювані джерела енергії.

Інші приклади систем включають використання систем SCADA для реалізації системи управління розподіленими енергетичними системами [13]. Однак найбільш широко використовуваним підходом останні кілька років є оптимальне управління цими системами: в [14] пропонується оптимальна стратегія управління для ізольованої системи для координації накопичення енергії та дизельних генераторів для максимального проникнення вітру при збереженні економічності системи та нормальні робочі характеристики; в [15] пропонується схема прогнозованого управління економічною моделлю задля досягнення оптимальних економічних показників в експлуатаційних витратах мікромережі, але не враховуючи терміну служби батареї; в роботі [16] пропонується новий підхід до управління прогнозуванням розподіленої економічної моделі, заснований на дисипативності, щоб дозволити користувачам мікромереж оптимізувати свої власні вигоди, але застосунок враховує тільки джерела сонячної енергії.

Розглянемо функціональні схеми систем керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства.

Приклад функціональної схеми, наведеної в роботі [7], представлений на рисунку 1.16.

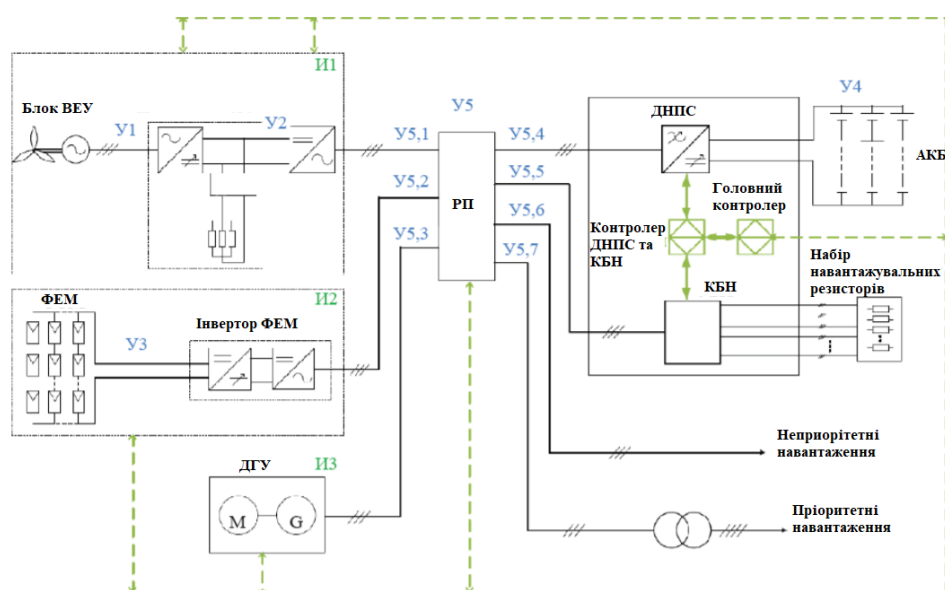


Рисунок 1.16 – Приклад функціональної схеми системи керування [7]

Двонаправлений перетворювач струму ДНПС є перетворювачем струму, що перетворює змінний струм мережі на постійний струм АКБ з перебігом енергії від мережі до АКБ (режим заряду АКБ) в період споживання енергії, та постійного струму АКБ до змінного струму мережі з протіканням енергії від АКБ до мережі (режим розряду АКБ) у період виробництва енергії. Як показано вище, ДНПС виступає як провідне джерело при відключених ДГУ та перевищення виробленої установками ВДЕ потужності споживання. Для ДНПС використано сучасну схему на основі статичного інвертора.

У складі типового комплексу мережевої установки ВЕУ представлена наступним обладнанням: вітроколесо із синхронним генератором на постійних магнітах; випрямляч з контролером управління турбіною (гондолою) у комплекті з регульованим баластом; мережевий інвертор ВЕУ Даний типовий комплект пропонується більшістю виробників у вигляді ВЕУ потужністю від 30 до 200 кВт.

Мережевий інвертор ВЕУ з погляду функціонування є інвертором, веденим мережею.

Для цього інвертора обов'язкова наявність напруги, тобто, серійні ВЕУ здатні функціонувати лише за наявності напруги (при зникненні напруги ВЕУ виключаються в режимі захисту «втрата мережі»). У загальному випадку, що розглядається, мережа задається напругою ДГУ чи напругою ДНПС.

У ПАМ передбачено можливість зміни наступних параметрів управління ВЕУ:

- обмеження вихідної потужності на заданому рівні;
- обмеження крутості зміни потужності часу (dP/dt) на заданому рівні.

Вихідна потужність ВЕУ може бути обмежена зверху заданим значенням на певний період часу, а крутість зміни вихідної потужності може бути обмежена за часом (dP/dt) [7].

СФЕУ з погляду видачі потужності в енергосистему аналогічна ВЕУ. Кінцевим пристроєм СФЕУ є інвертор, ведений мережею (як і ВЕУ).

Найчастіше в інверторах СФЕУ функцію обмеження вихідної потужності зверху не передбачено.

Кількість СФЭУ у випадку не обмежена, оскільки джерело є веденою мережею, у загальному випадку можлива установка будь-якої кількості паралельно працюючих джерел [8].

Узагальнюючою умовою динамічного перерозподілу потужності є виконання співвідношення балансу потужностей: потужність споживаної енергії в режимі, що встановилася, повинна дорівнювати потужності генерованої енергії. Баланс потужностей забезпечує стабілізацію частоти та напруги мережі.

Впровадження подібної системи дозволило знизити:

- витрати електроенергії на власні потреби з 510 до 160 тис. кВт год (більш ніж у 3 рази);
- витрату дизельного палива з 719 до 416 тис. л на рік (на 40%);
- обсяги викидів CO₂ на 600 т

Все це вказує на ефективність запропонованої системи в роботі [8].

Також розглянемо систему керування, яка наведена в роботі [17]. Спрощена блок-схема, що ілюструє структуру енергорозподіленої системи, представлена на рисунку 1.17.

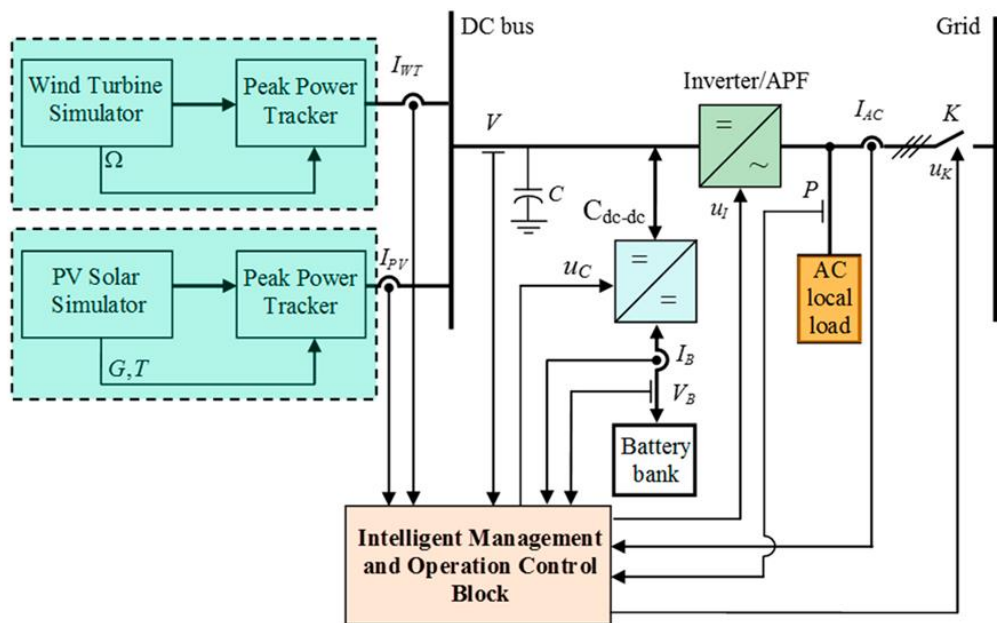


Рисунок 1.17 – Спрощена блок-схема, що ілюструє структуру енергорозподіленої системи [17]

У систему входять два джерела енергії, засновані на перетворенні відновлюваної енергії: вітряна турбіна та фотоелектричні панелі. Ці джерела вводять струми I_{WT} і I_{PV} в проміжний ланцюг постійного струму, і звідси потік енергії може бути переданий або локальну мережу, або, зрештою, мережу або батарею.

У першому випадку, поки мережа підключена та доступна, блок з написом «Inverter/APF» активує функцію фільтра активної потужності та може забезпечити двоспрямовану передачу енергії, забезпечуючи вимоги до якості електроенергії для підключення до мережі.

Якщо відновлювані джерела виробляють більше енергії, ніж потрібно для задоволення місцевих споживачів, а також задоволення вимог до зарядних батарей, передача енергії в мережу виконується на основі енергетичного балансу.

Однак, якщо енергії, що надходить із відновлюваних джерел, недостатньо і необхідно забезпечити потік енергії з мережі для заряджання

акумулятора, тоді інвертор / APF працює в режимі ШИМ випрямляча. Якщо мережа недоступна, блок «Інвертор/APF» працює лише як інвертор напруги,

Другий випадок відноситься до переходу з/на акумулятор. Важливою умовою є те, що накладається на систему критерій продуктивності, що показує рівень забезпечення режиму регулярної зарядки/розрядки батареї (наскільки це можливо, враховуючи, що і відновлювані джерела, і навантаження мають випадкові характеристики).

Ця вимога вводиться за допомогою керування двонаправленим перетворювачем "С dc-dc" одночасно з іншою одночасною вимогою: зменшенням передачі енергії.

Ієрархічна система керування містить два рівні: нижній рівень керування, який відноситься до систем керування, що належать до компонентів системи, і більш високий рівень, що відноситься до керування потоками енергії, з урахуванням змішаного критерію, який враховує вартість енергії, а також термін служби батареї.

Реалізований нижній рівень для вітроенергетичної системи забезпечує оптимальні режими вітряної турбіни (з погляду на енергетичний критерій), тобто забезпечує максимальне перетворення потужності в області 2 (режим часткового навантаження) та обмеження потужності в області 3 (область роботи з повним навантаженням).

Керуюче рішення для сонячної енергетичної системи забезпечує роботу на оптимальних режимах характеристик, що ґрунтуються на математичній моделі фотоелектричної панелі. Система управління «Інвертор/APF» виконує режим ШИМ інвертор/випрямляч, забезпечуючи рівень вихідної напруги та вимоги до якості електроенергії, що пред'являються до фільтра активної потужності.

Система управління перетворювача «С dc-dc» забезпечує напрям і інтенсивність енергії, що передається. Вищий рівень управління реалізований у «Блоці інтелектуального управління та контролю операцій».

Управління системою вищого рівня пов'язане з розробкою алгоритму управління, який відповідає за передачу електроенергії між компонентами системи: відновлюваними джерелами енергії, загальнодоступною мережею, накопичувачем енергії (батареєю) та локальною мережею (навантаженням).

Функціональна схема системи керування, яка представлена в роботі [18], наведена на рисунку 1.18.

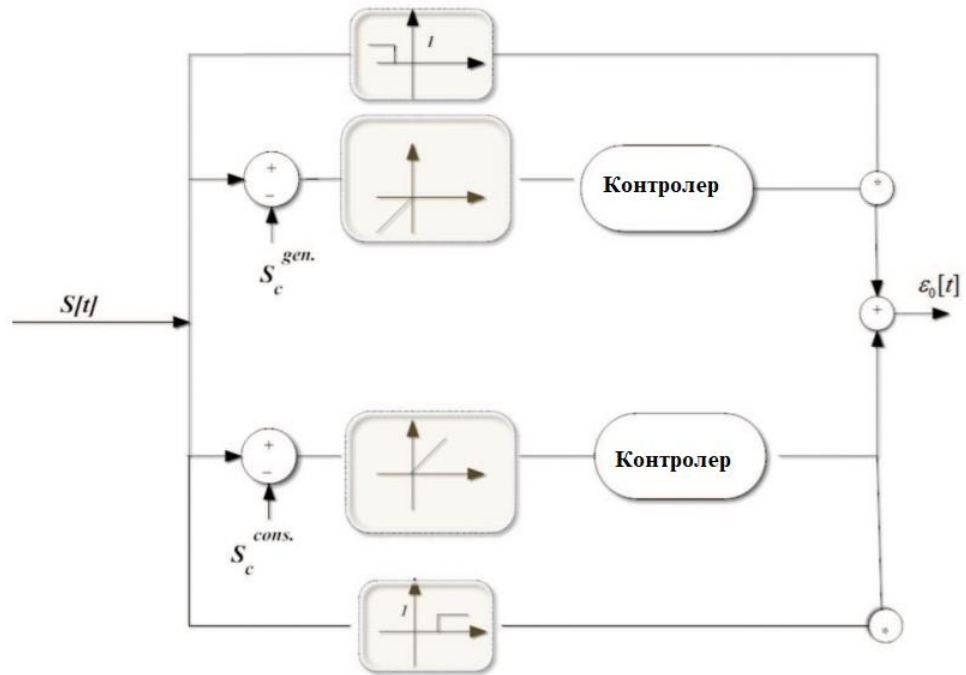


Рисунок 1.18 - Функціональна схема системи керування розподілом джерел енергозабезпечення

В подібних системах керування необхідно застосовувати регулятори.

На рисунку 1.19 показана структурна схема системи з ПІД-регулятором. ПІД-регулятор порівнює виміряне значення процесу Y з заданим опорним значенням Y_0 . Потім різниця, чи помилка, ε , обробляється для розрахунку нового вхідного процесу U .

Цей новий вхідний процес буде намагатися наблизити значення вимірюваного процесу до заданого значення.

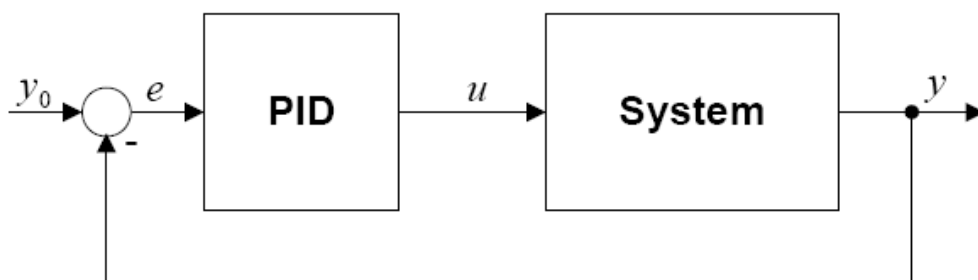


Рисунок 1.19 – Структурна схема системи керування із замкнутим контуром на основі ПІД-регулятора

Альтернативою системі управління із замкнутим контуром є система управління з відкритим контуром. Відкритий контур управління (без зворотного зв'язку) у багатьох випадках не є задовільним, і його застосування часто неможливо через властивості системи.

На відміну від простих алгоритмів управління, ПІД-регулятор здатний управляти процесом, ґрунтуючись на його історії і швидкості зміни. Це дає більш точний і стабільний метод управління.

Рисунок 1.20 показує схемне рішення ПІД-регулятора, де T_p , T_i , і T_d позначають постійні часу пропорційної, інтегральної і диференціальної складових відповідно.

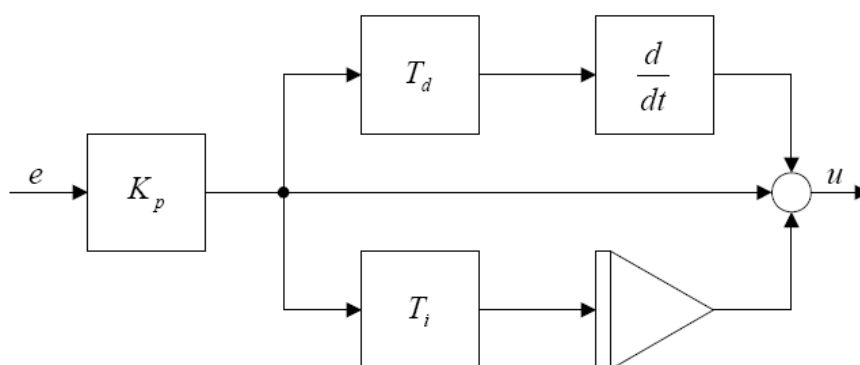


Рисунок 1.20 – Схема ПІД-регулятора

Пропорційна складова

Пропорційна складова (П) дає керуючий сигнал пропорційно до обчисленої помилки. На рисунку 1.21 стаціонарна помилка в значенні

системного процесу з'являється після зміни опорного сигналу (ref). Використання занадто великого П-члена дасть нестійку систему.

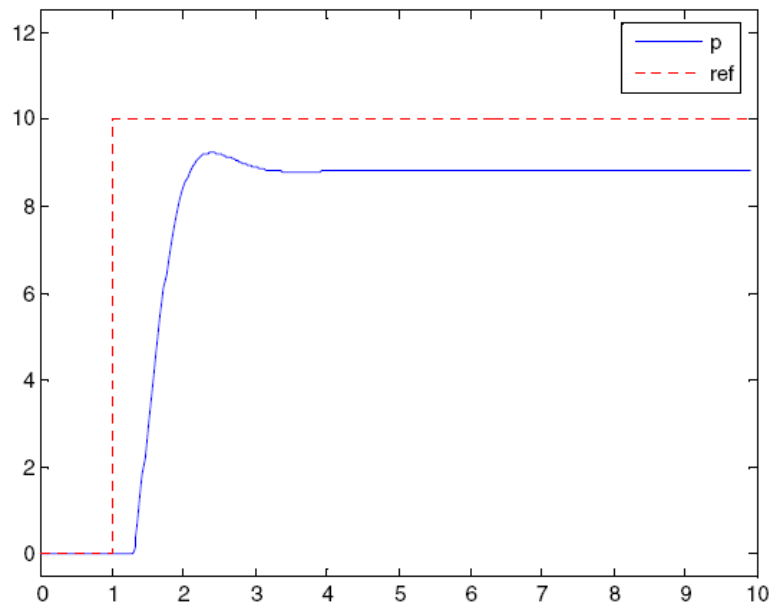


Рисунок 1.21 – Відгук П-регулятора на сходишкову зміну опорного сигналу

Інтегральна складова. Інтегральна складова (I) являє собою суму попередніх помилок. Підсумовування помилки триватиме до тих пір, поки значення системного процесу не стане дорівнювати потрібному значенню.

Рисунок 1.22 показує ступінчастий відгук I та ПІ-регуляторів. Як видно із рисунка, відгук ПІ-регулятора не має стаціонарної помилки, а відгук I-регулятора є дуже повільним.

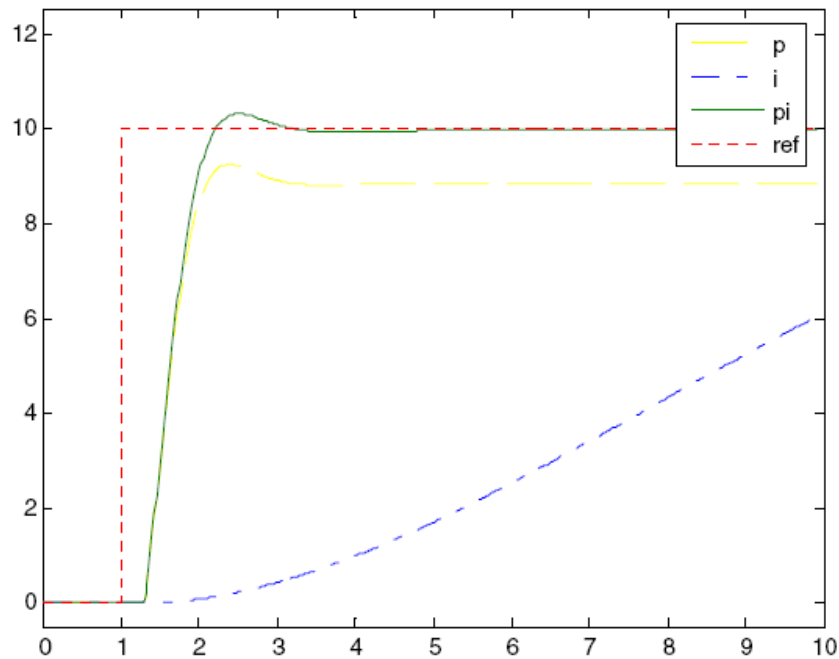


Рисунок 1.22 – Відгук I- та ПІ-контролера на сходячкову зміну опорного сигналу

Диференційна складова

Диференціальна складова (Д) являє собою швидкість зміни помилки. Додавання цієї складової покращує відгук системи на раптову зміну її стану.

Рисунок 1.23 показує відгуки Д і ПД контролера. Відгук ПД-контролера дає швидше зростання значення процесу, ніж П-контролер.

ПД-регулятор дає найкращу продуктивність, оскільки використовує всі складові разом. Рисунок 1.24 порівнює П, ПІ, і ПД-регулятори. ПІ покращує П, видаливши стаціонарну помилку, а ПД покращує ПІ більш швидким відгуком.

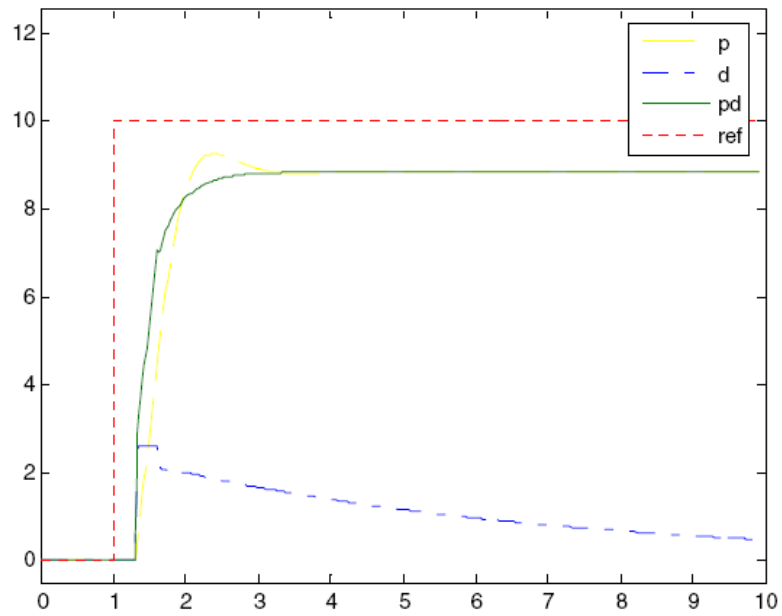


Рисунок 1.23 – Відгук Д- та ПД-контролера на сходинкову зміну опорного сигналу

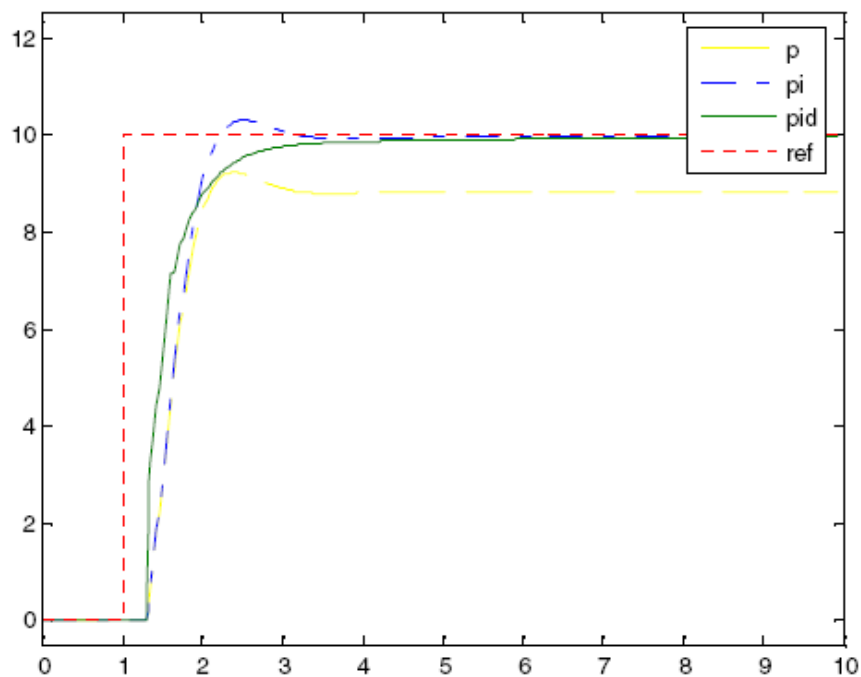


Рисунок 1.24 – Відгук П-, ПІ- та ПІД-регулятора на сходинкову зміну опорного сигналу

Таким чином, актуально використовувати ПІД-регулятор в системі керування.

Той факт, що потужність, необхідна для навантаження, і потужність, що виходить із відновлюваних джерел енергії, є випадковими величинами, визначає безліч ситуацій, якими необхідно керувати.

Наявність батареї дуже важлива не лише як накопичувач надлишкової енергії з відновлюваних джерел (що сприяє подачі енергії на навантаження під час дефіциту енергії), а й як «датчик» рівня заряду.

Зміна напруги батареї, яка безпосередньо пов'язана із запасеною енергією, значною мірою відображає енергетичний контекст розподіленої системи. Цей контекст можна охарактеризувати набором станів, в яких може знаходитися інтегрована система. Вектор «станів» може бути визначений: поточним значенням напруги батареї, V_b , яка вважається пропорційною накопиченій енергії в системі, зміною накопиченої енергії ΔV та прогнозованим значенням потужності для відновлюваних джерел енергії та навантаження, d_{ep} .

Використання прогнозів для кожного з трьох ступенів нерозумно та надмірно; важливий прогноз дефіциту/надлишку енергії в розподіленій системі, тобто різниця між потужністю відновлюваних джерел енергії та навантаженням. Отже, стани, які відображають контекст енергії системи, можуть бути визначені вектором:

$$x_s = [V_b, \Delta V, d_{ep}]^T.$$

На основі цих станів система управління встановлює напрямок та величину передачі електроенергії між розподіленою системою та мережею.

Алгоритм управління може розглядати два підходи, а саме:

- Підхід чіткого типу, який використовує простий алгоритм розпізнавання «контрольних ситуацій». Тут варто відмітити такі дискретні команди:

C_1 : важливий перехід із мережі в розподілену систему ($P_{gs} = 100\%$);

- C_2 : перенесення середовища з мережі у розподілену систему ($P_{gs} = 50\%$);
- C_3 : передача нуля в розподілену систему ($P_{gs} = 0\%$);
- C_4 : перенесення середовища з розподіленої системи до мережі ($P_{gs} = 50\%$);
- C_5 : важливий перехід із розподіленої системи до мережі ($P_{gs} = 100\%$).

- Підхід нечіткого типу, у якому енергетичний стан системи оцінюється у лінгвістичних термінах. У цьому випадку принцип управління, показаний вище, зберігається, але всі змінні, задіяні в системі, включаючи команду, що встановлює напрямок та величину передачі енергії, отримуються з нечіткою оцінкою, а закон управління виходить за допомогою нечіткого виводу.

Оцінка двох підходів показує, що нечіткий підхід дозволяє більш тонко контролювати передачу енергії. Метод, заснований на чітких змінних, може бути представлений як окремий випадок нечітких методів, коли в реалізації використовуються спеціальні функції приналежності, що дозволяє уникнути обчислення відстані між векторами.

Проектування та тестування системи управління верхнього рівня виконується з урахуванням кількох сценаріїв режимів роботи. Створення цих сценаріїв пов'язане з такими вимогами:

- тестування роботи системи у різних ситуаціях повинне відбуватися із відновлюваними джерелами енергії. Для побудови розподіленої системи необхідно враховувати як мінімум два режими: літній та зимовий;

- тестування роботи системи у двох режимах роботи акумуляторної батареї: буферному режимі, що вважається стандартним, та періодичному режимі, в якому цикли заряджання та розрядки відбуваються під час нормальної роботи розподіленої системи. Ці цикли рекомендуються для збільшення терміну служби батареї.

На даному етапі для систем керування варто виділити ще й задачу прогнозування потужності від альтернативних джерел енергії.

Алгоритми прогнозування в системах керування можуть бути реалізовані на основі лінійних моделей часових рядів AR та ARMA. Проте

результати, які можуть бути отримані з допомогою цих класичних алгоритмів, можуть відрізнятися залежно від фізичної природи прогнозованого часового ряду.

Таким чином, середньо- та довгострокові компоненти швидкості вітру мають автокореляційну функцію з дуже повільною спадною зміною, що дає хорошу можливість для прогнозування.

Хороші результати, отримані в цьому випадку, ілюструє зразок, показаний на рисунку 1.25, де враховувалися різні значення меж прогнозування при використанні моделі типу ARMA.

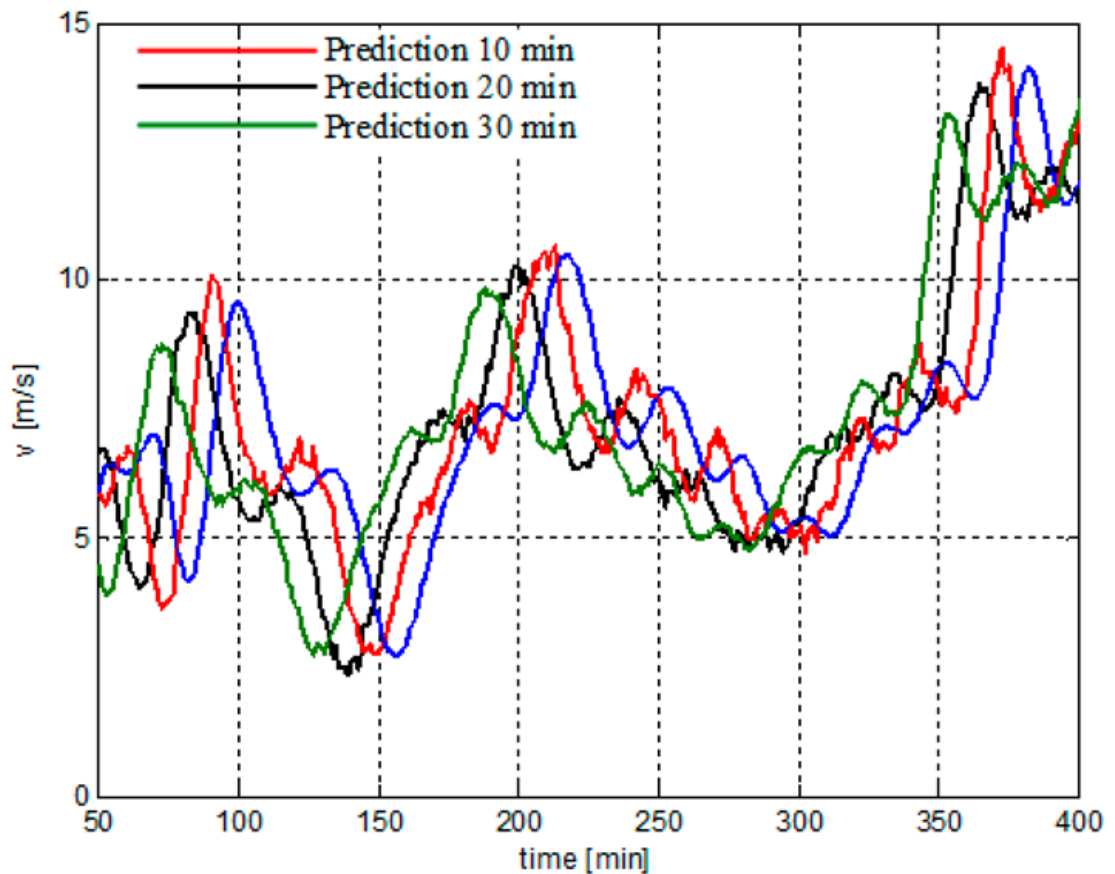


Рисунок 1.25 – Прогнозування швидкості вітру у системі керування

[17]

Властивості турбулентності дуже близькі до властивостей білого шуму, оскільки фільтр для складової турбулентності має другий порядок з унітарним надлишком полюсів. У цих умовах автокореляційна функція має швидку

спадну варіацію, і, отже, прогнозування дуже ускладнене (особливо при використанні дуже простих підходів, таких як лінійні предиктори).

Як уже згадувалося, прогнозована змінна в системі - це різниця між сумою потужностей відновлюваних джерел енергії та потужністю, що споживається по навантаженню. У цьому випадку є два компоненти, які серйозно обмежують характеристики прогнозування. Один із них – це турбулентний компонент швидкості вітру. Інший – випадкова зміна потужності навантаження (локальна мережа).

Оскільки середнє значення цього навантаження нижче, відсоткові випадкові зміни потужності важливіші (при підключенні та відключенні різних споживачів), і прогнозування надлишку/дефіциту потужності утруднене.

1.4 Висновки до розділу 1

Виходячи з огляду літератури з теми дослідження, який наведений у розділі 1, можна встановити, що типова система керування розподілом джерел енергозабезпечення з застосуванням ВДЕ підприємства може складатися з наступних складових елементів:

- контролерів;
- перетворювачів струму;
- безпосередньо джерел енергозабезпечення;
- ланцюгів контролю та управління;
- акумуляторних батарей;
- інверторів.

Окрім цього, системи керування можуть додатково включати інтелектуальні модулі прогнозування.

Виявлено наступні переваги існуючих рішень від застосування систем керування розподілом електроенергії з застосуванням ВДЕ:

- зменшення витрат електроенергії на власні потреби на 30%;

- зменшення вартості енергозабезпечення на 30%;
- зменшення обсягів викидів CO₂ на 15%.

Основною проблемою застосування систем керування розподілом джерел енергозабезпечення з застосуванням ВДЕ є ефективність, економічна доцільність та екологічність. Реалізація подібної системи та вибір обладнання для неї буде наведена у наступних розділах роботи.

2 ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛОМ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДПРИЄМСТВА

2.1 Розробка структурної схеми системи керування розподілом джерел енергозабезпечення

В межах даного розділу роботи виконаємо розробку системи керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства, а також підберемо основне обладнання та устаткування для його реалізації на прикладі підприємства.

Для забезпечення безпечного, надійного, ефективного та економічного функціонування систем енергозабезпечення з застосуванням відновлюваних джерел енергії необхідна спеціалізована автоматична система керування та контролю.

Найчастіше при побудові АСК подібних установок використовується підхід (структура) децентралізованого управління, коли керуюча система представляється у вигляді сукупності локальних (автономних) автоматичних систем управління, кожна з яких має власну логіку управління об'єктами. АСК таких установок є незв'язаними, вони (ФЕУ, ВЕУ, пристрої силової електроніки і т.д.) являють собою сукупність незалежних за керованими параметрами об'єктів.

При цьому самі системи, згідно з їхніми принципами, є сукупністю взаємопов'язаних елементів (ФЕУ, ВЕУ, пристрої силової електроніки і т.д.), а те, що вони в здебільшого функціонують «відокремлено» з точки зору системи управління, швидше є їх недоліком, ніж перевагою. Створення системи керування з централізованою структурою, коли вона є взаємопов'язаною, з головним центральним керуючим пристроєм, з'єднаним багатьма каналами зв'язку з об'єктом (або об'єктами) управління, дозволяє суттєво розширити функції АСК, а також забезпечити принципово нові можливості. У них з'являється ієрархічність, багаторівневість, реалізується поділ на підсистеми -

відносно незалежні частини системи, що мають властивості, які мають підціль, на досягнення якої вони орієнтовані.

Структурні схеми систем керування можуть бути побудовані як на основі аналогових, так і дискретних (цифрових) засобів. Перші, як правило, реалізовані на інтегральній мікросхемотехніці. Вони є спеціалізованими мікросхемами, в яких апаратно, тобто за допомогою окремих схемних елементів та зв'язків між ними, реалізований певний набір функцій. В аналогових інтегральних схемах вихідний та вхідний сигнали пов'язані безперервною функцією. Основними вузлами подібних схем є компаратори, підсилювачі, буферні каскади та ін. Аналогові схеми характеризуються високою швидкістю, але обмежують можливості АСК.

Дискретні системи управління можуть бути реалізовані як на інтегральній мікросхемотехніці, так і на мікропроцесорній техніці. У цифрових інтегральних схемах вхідний та вихідний сигнали є дискретними. Серед цифрових інтегральних схем, застосовуваних у системах керування, слід зазначити схеми транзисторно-транзисторної логіки, і навіть схеми на металоокисних напівпровідникових транзисторах.

Одним із перспективних шляхів удосконалення систем управління є використання мікропроцесорної техніки. Системи керування, що містять мікропроцесорні комплекти, дозволяють ефективніше вирішувати завдання регулювання вихідних параметрів та реалізувати глибший поточний контроль за роботою системи управління, а також забезпечити більш точну діагностику її вузлів та елементів. Основною же перевагою застосування мікропроцесорних комплектів є можливість широкої уніфікації апаратних засобів системи керування. При цьому різноманітність функцій забезпечується розробкою відповідних програм керування.

Ще недавно до недоліків мікропроцесорної технології відносили їх недостатню швидкість, проте зараз на ринку електронних компонентів пропонується безліч типів мікропроцесорних комплектів різних виробників, і

багато з них володіють достатньою обчислювальною потужністю для реалізації необхідних функцій.

У деяких випадках (за потреби) може застосовуватися і комбінований принцип побудови АСК.

Враховуючи вищенаведене та згідно з оглядом літератури, який наведений у першому розділі магістерської дисертації, виконаємо розробку структурної схеми системи керування, яка представлена на рисунку 2.1.

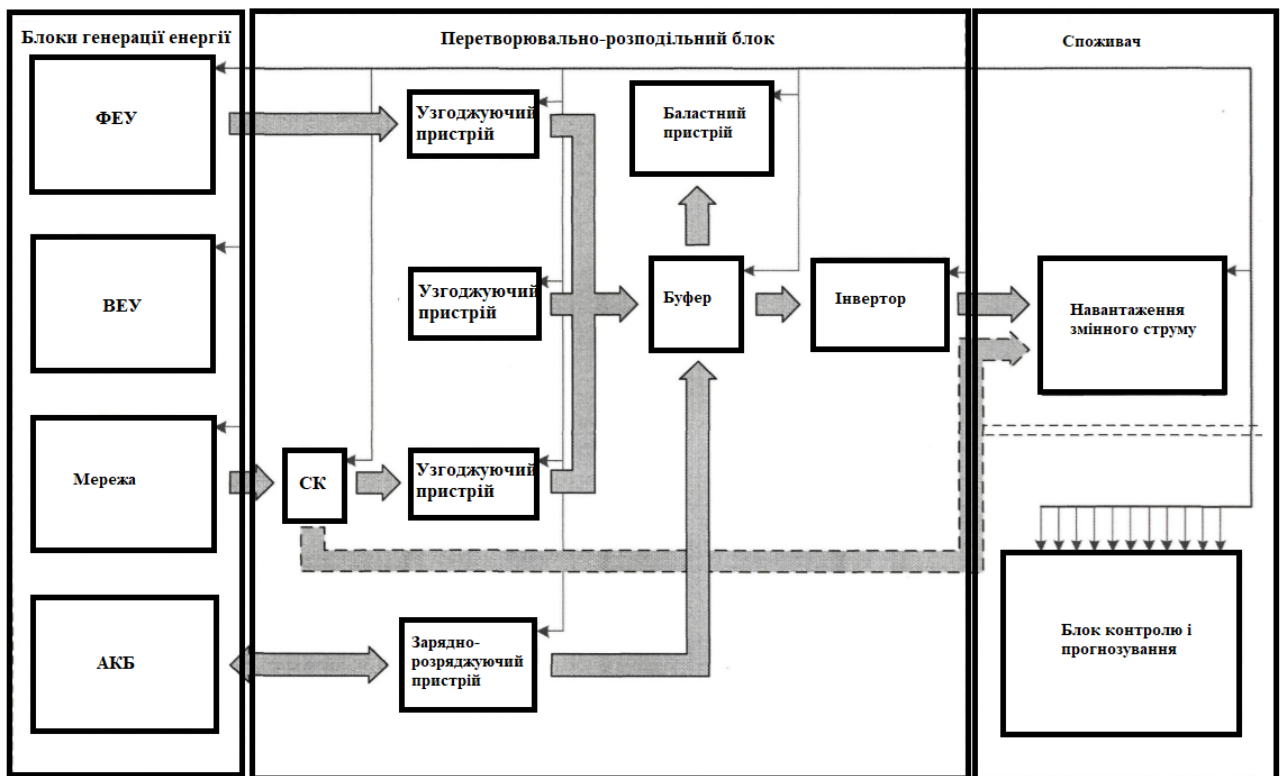


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи керування розподілом джерел енергозабезпечення

Структурна блок-схема складається з наступних блоків: ФЕУ; ВЕУ; мережа; АКБ; силовий комутатор (СК); узгоджуючі пристрої; баластний пристрій (БП); буфер; інвертор; навантаження змінного струму (споживач); блок контролю і прогнозування.

Виходячи з функціональних особливостей елементів, вони умовно об'єднані в чотири групи: блоки генерації енергії, перетворювально-розподільні блоки, споживач та система контролю і прогнозування.

До блоків генерації належать: ФЕУ, ВЕУ, потужність мережі 10кВ та АКБ. Таким чином, є два некерованих первинних перетворювача (ФЕУ та ВЕУ); один «квазі-керований» (накопичувач) та одне кероване джерело (АКБ), що забезпечує безперебійне електроживлення споживача.

Перетворювально-розподільні блоки - це елементи силової електроніки, взаємопов'язані «мікромережею» постійного струму, що виконують функції перетворення, розподілу та регулювання електричної енергії.

Принцип функціонування системи.

Первинні потоки енергії відновлюваних джерел перетворюються на електричну енергію. Потім електрична енергія надходить на відповідні для кожної енергоустановки узгоджувального пристрою:

- узгоджувачий пристрій ФЕУ здійснює відбір максимальної потужності від нього при зовнішніх умовах, що постійно змінюються (сонячне випромінювання, температура перетворювача) шляхом узгодження свого внутрішнього опору з опором джерела. При роботі пристрій запасує енергію у власному конденсаторі, а при перевищенні напруги передає її до буферу системи;

- узгоджувальний пристрій ВЕУ здійснює аналогічну функцію ФЕУ. Різниця полягає лише у наявності випрямляча;

- узгоджувачий пристрій від мережі 10кВ здійснює активну корекцію коефіцієнта потужності. На відміну від попередніх двох пристроїв полягає в алгоритмі керування.

У випадку з ВЕУ використовується випрямляч. Можливе також схемотехнічне рішення без використання випрямляча завдяки використанню підвищувачого імпульсного перетворювача працюючого і з негативною, і позитивною напівхвильою змінного струму.

У сукупності узгоджувальні пристрої утворюють імпульсний перетворювач, що здійснює функцію підсумовування енергії від джерел енергозабезпечення.

Виводи узгоджувальних пристроїв, БП та інвертора підключені до буфера (батареї суперконденсаторів або електричних конденсаторів), в якому відбувається накопичення енергії. Потім вона передається інвертору, зарядно-розрядному пристрою для накопичення енергії та баластного пристрою у разі надлишку електричної енергії. Буфер - це ланка, яке здійснює баланс між споживанням та виробленням електричної енергії.

Основним параметром, що характеризує баланс є напруга буфера. Якщо напруга вище встановленого значення, то подається команда на відведення зайвої енергії, яка, в першу чергу починає накопичуватися в АКБ, а при повній зарядці АКБ - споживатися баластним навантаженням. Якщо напруга на буфері нижче встановленого значення, що означає перевищення величини споживання енергії над виробленням, подається команда на завантаження додаткової енергії у буфер від АКБ. Кількість електроенергії, яка підводиться або відводиться від буфера, дозволяє зберігати напругу буфера в рамках нормованого.

Інвертор забезпечує споживача електричною енергією у необхідній кількості та належній якості. При роботі системи паралельно з іншою мережею він функціонує синхронно із нею.

Працездатність та контроль всіх елементів АСК як окремо, так і загалом здійснює автоматична система контролю та прогнозування.

Силовий комутатор здійснює електричне перемикання від узгоджувального пристрою на навантаження та навпаки за необхідністю, що визначається алгоритмами АСК системи.

Окрім цього, до структурної системи керування розподілом джерел енергозабезпечення додано блок прогнозування погоди, за допомогою якого можна встановити прогнозовану потужність, яку можна отримати завдяки

ВДЕ. Даний блок не є обов'язковим, проте може застосовуватися в подібних системах.

2.2 Розробка функціональної схеми системи керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства

Функціональна схема системи керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства, що визначає оптимальні параметри складається з двох взаємозалежних блоків (рисунок 2.2).

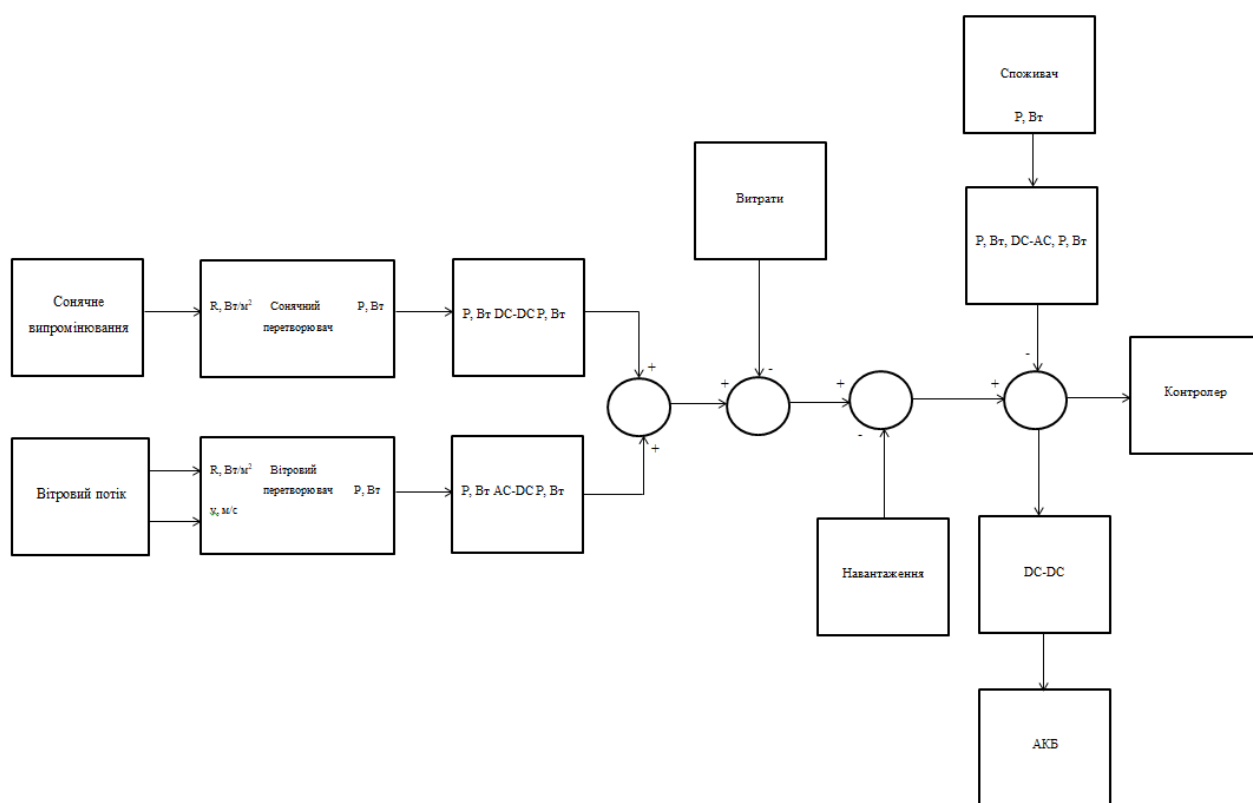


Рисунок 2.2 – Функціональна схема системи керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства

Перший блок визначає оптимальний склад та параметри ВДЕ. Друга частина визначає коефіцієнти використання установок та коригує склад та параметри ВДЕ або визначає ступінь участі (частку покриття навантаження) компенсуючого елемента електропостачання споживача.

Функціональна модель розроблена ієрархічна, блоки, представлені на рисунку 2.2, об'єднані в групи (підсистеми) функціонально пов'язаних блоків, всередині підсистем першого рівня, де, в свою чергу, розташовуються підсистеми другого рівня.

Розглянемо докладніше блоки функціональної схеми (Субмоделі).

В блоці «сонячне випромінювання» досліджується приймальний майданчик. Може виконуватися розрахунок як для горизонтального, так і нахилоного під певним кутом до горизонту або орієнтованого на сонце приймального майданчика, а також для вхідної апертури концентратора із системою стеження за сонцем. В даному блоці визначається сонячна радіація, що приходить при прозорій атмосфері для будь-якого типу приймальної площадки протягом усього розрахункового періоду для розглянутої місцевості.

На основі отриманих даних формується масив розподілу в часі енергії сонячного випромінювання.

Вхідними параметрами блоку є: широта [$^{\circ}$]; середньомісячні значення суми прямої сонячної радіації [МДж/м] та суми розсіяної сонячної радіації [МДж/м²] за середніх умов хмарності; середнє квадратичне відхилення середньої добової кількості загальної хмарності, [бали]; середня кількість ясних та похмурих днів за загальної хмарності; повторюваність ясного (0-2 бали), напівясного (3-7 бали) та похмурого (8-10 балів) стану неба за загальною хмарністю, кут нахилу приймального майданчика до горизонту.

В блоці «ФЕУ» розраховується середньомісячна швидкість вітру та його коефіцієнт варіації Потім враховуються виправлення на місцевість і висоту, а також визначаються параметри розподілу, згідно яких і генерується масив, що описує зміну швидкості вітру. Вхідними параметрами блоку є: середня місячна швидкість вітру [м/с]; коефіцієнт варіації швидкості вітру; повторюваність [%] різних градацій швидкості вітру; градація швидкості вітру.

Від субмоделей генеруючих пристроїв дані надходять у субмоделі перетворювальних пристроїв «Сонячний перетворювач», «Вітровий перетворювач», що являють собою підсистеми функціонально пов'язаних блоків, моделюючих процеси, що характеризують перетворення потоків первинного джерела енергії в електрику.

Вхідними параметрами блоку «Сонячний перетворювач» є: коефіцієнт світлопропускання ФЕУ; ККД ФЕУ; площа ФЕУ, [м]; коефіцієнт заповнення площі ФЕУ фотоелектричними перетворювачами; коефіцієнт неузгодженості ФЕУ; температура довкілля [К].

Вхідними параметрами блоку «Вітряний перетворювач» є: площа поперечного перерізу повітряного потоку, що приходить на вітроколесо (відмітна площа), [м]; максимальна швидкість вітру, [м/с]; вектор швидкостей вітру, ККД генератора.

Субмоделі «DC-DC», «AC-DC» та «DC-AC» - підсистеми, що враховує втрати електричної енергії через узгодження електричних характеристик струму. Вступним параметром цих блоків є ККД відповідних перетворювачів.

Блок «Витрати» - підсистема, що моделює втрати електричної енергії провідників системи. Вступний параметр блоку – погодинні середні добові втрати, [Вт].

Блок «Навантаження» - підсистема, що враховує власні потреби системи. Вхідним параметром блоку є середнє навантаження.

Блок «Споживач» - підсистема, що враховує необхідні потреби електроенергії споживача. Вхідний параметр блоку – навантаження споживача [кВт].

Блок «АКБ» - підсистема, що враховує процес акумулювання та генерації накопиченої енергії.

Блоки підсистеми реалізують функції контролю, дефіциту та профіциту електричної енергії в системі, а також враховують вироблення чи накопичення енергії АБ.

Вступними параметрами блоку є: ємність АБ, [А-год]; номінальна напруга АБ, [В]; допустима глибина розряду АБ; коефіцієнт саморозряду АБ; ККД зарядно- розрядного циклу АБ.

Блок «Контролер» виконує регулювання розподілом джерел енергозабезпечення підприємства.

2.3 Вибір елементів системи керування

Виконаємо вибір обладнання для реалізації системи керування розподілом джерел енергозабезпечення.

Вертикальний (ортогональний) вітрогенератор MAGLEV є одним із найкращих у світі за сукупністю технічних характеристик, у ньому поєднано ККД горизонтальних та переваги вертикальних вітрогенераторів. Завдяки новітнім технологіям та серійному виробництву цей вітрогенератор може дозволити практично будь-хто.

Завдяки відпрацьованій геометрії лопатей вітрогенератора – вітрогенератор Maglev практично безшумний. Має дуже чудовий зовнішній вигляд: оригінальна гіроскопічна форма ротора в сукупності з оптимальним профілем лопатей.

Оригінальна зовнішність не заважає домагатися реального ККД, що практично наближається до номіналу за будь-якого напрямку вітру. Дана конструкція стійка до сильного вітру (ловить пориви вітрів), здатна витримати ураганний вітер.

Вітрогенератор Maglev забезпечений лише одним підшипником (японського виробництва з багаторазовим запасом міцності).

Вітрогенератор Maglev за рахунок замкнутої форми лопатей та компактності форм можна монтувати в безпосередній близькості до підприємств, на відміну від горизонтальних, для яких необхідний захист відстанні через підвищену шумність та вібрацію.

Основною перевагою вертикального вітрогенератора Maglev є використання технології магнітної левітації. Внаслідок цього досягається надійність опорної частини генератора. Треба брати до уваги, що горизонтальні генератори мають опорний підшипник, а у вертикального вітрогенератора Maglev за рахунок принципу магнітної левітації ротор генератора висить у повітрі, за рахунок цього досягається легке стругування ротора вже при найменших швидкостях вітру.

Використання високоенергетичних магнітів у роторі генератора на основі рідкісноземельних сплавів дало можливість використання безщіткового методу зняття енергії. Багатополюсність розташування магнітів генератора дозволяє досягати номінальної потужності на малих оборотах. На виході генератор видає трифазний струм змінної напруги.

Виходячи з цього, керуючись технічними даними з вітрогенераторів, вивченого та проаналізованого обладнання, для системи керування розподілом генерації електроенергії на базі ВДЕ будуть встановлені ВЕУ потужністю 1кВт. У цьому випадку можна вибрати установки можливе поєднання кількох генераторів для підсумовування вихідної потужності до 100 кВт.

На рисунку 2.3 зображено один із варіантів встановлення ВЕУ Maglev 1000.



Рисунок 2.3 – Варіанти встановлення ВЕУ [20]

При виборі сонячних батарей слід враховувати їх потужність, вартість, розміри та інші технічні характеристики, а також гарантійні терміни, надані виробником.

У ході досліджень було вивчено та проаналізовано обладнання фотоелектричних елементів, які підійдуть для забезпечення електропостачання споживачів та застосування в системі розподіленої генерації енергії.

Виходячи з цього, було обрано сонячну батарею SilaSolar 350Вт PERC (5ВВ).

Зовнішній вигляд такої батареї представлений на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 - Сонячна батарея SilaSolar 350Вт PERC (5BB) [20]

Таблиця 2.1 – Характеристика сонячних модулів SIM 350 PERC (5BB)

Загальні параметри	Значення
Модель	SIM350 PERC (5BB)
Тип	Монокристалічний PERC
Потужність	350 Ватт
Кількість елементів	72шт (6 x 12)
Розмір елементів	156 x 156 мм
Ефективність модуля, %	18,03
Ефективність комірки, %	20,60
Сонячний елемент	PERC 5BB (5 bus bar)
Строк служби	не менше 30 років
Падіння потужності за 12 років	не більше 10%
Падіння потужності за 30 років	не більше 20%
Гарантія	5 років

Інші характеристики	
Матеріал рамки	Анодований алюмінієвий сплав
Переднє скло	Текстуроване, загартоване ударо-міцне
Клас	A
Кількість діодів, шт	3
Провід 0,9м з конекторами МС4	Є
Вітрове навантаження	до 2400Па (244 кг на квадратний метр)
Снігове навантаження	до 5400Па (550 кг на квадратний метр)
Містостійкість	Макс. діаметр 25мм, макс. швидкість 83 км/год
Сертифікати	TUV:IEC 61215 Edition II / IEC 61730 I and II
Температурні режими	
Робоча температура	від -40°C до +85°C
Габарити, вага:	
Довжина	1956 мм
Ширина	992 мм
Висота	45 мм
Загальна площа	1,62 м ²
Вага	23 кг

При виборі інверторів у ході досліджень було вивчено та проаналізовано обладнання інверторів.

Виходячи з цього попередньо було обрано інвертор МАП SINE DOMINATOR UPS (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Інвертор МАП SINE DOMINATOR UPS [20]

Однак надалі було встановлено, що обладнання компанії «МікроАрт» є економічно не вигідним, оскільки максимальна вхідна напруга в інверторів 48 В, відповідно підвищення напруги шляхом послідовного з'єднання фотоелектричних елементів з метою зменшення кількості інверторів, виходячи з фінансових міркувань, для економічної вигоди не є можливим.

Виходячи з цього, було обрано інвертор SILA PRO МН. Зовнішній вигляд представлений на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд SILA PRO МН [20]

Гібридні інвертори SILA PRO МН це комбіновані інвертори/зарядні пристрої потужністю від 3 000 до 10 000 кВт із вбудованим контролером

заряду, з можливістю роботи як в режимі автономного, так і в режимі мережного інвертора з функцією підмішування енергії в мережу, для забезпечення безперебійного живлення, з можливістю вибору пріоритетів заряджання та навантаження, паралельного підключення та функції віддаленого (через інтернет) моніторингу.

Гібридні інвертори SILA PRO (МН-серії) оснащені сухим контактом (для керування генератором) та можливістю паралельного підключення до 6 пристроїв з максимальною потужністю до 600 кВт.

Ця серія ідеально підійде для використання у складі сонячної електростанції, а також для організації безперебійного (аварійного) електропостачання.

Особливості:

- Чиста синусоїда на виході;
- Три фази;
- Мікропроцесорне управління;
- Вбудоване стеження за точною максимальною потужністю (ТМП) сонячної батареї - 2шт;
- Декілька режимів роботи: паралельно з мережею, автономно, паралельно з мережею в режимі резервного джерела;
- Великий рідкокристалічний дисплей відображає всю основну інформацію про роботу системи сонячного електропостачання;
- Можливості для з'єднання з комп'ютером для моніторингу роботи системи електропостачання;
- Регулювання зарядного струму максимум до 200А;
- Функція моніторингу через стільникову мережу;

Основні режими:

1. Grid-tie (з'єднаний із мережею) . У цьому режимі інвертор працює як звичайний мережевий фотоелектричний інвертор. Акумулятори в цьому режимі не потрібні.

2. Grid-tie with backup (з'єднаний із мережею з резервування). У цьому режимі інвертор працює як мережевий фотоелектричний інвертор, але зберігає працездатність під час зникнення мережі за рахунок підключення до роботи акумуляторів. Надлишки енергії від сонячних батарей, не спожиті акумуляторами на заряд та навантаженням, спрямовуються до мережі.

3. Off-grid (автономний). У цьому режимі інвертор працює без віддачі енергії в мережу. Зберігається можливість заряду акумуляторів та живлення навантаження від мережі чи генератора.

Характеристики інверторів типу SILA PRO представлені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Характеристики інверторів типу SILA PRO

Загальні параметри	Значення
Модель	Система трифазних інверторів SILA PRO
Тип пристрою	Безтрансформаторний
Кількість фаз	Три
Порти комунікації	RS-232/USB, CAN Interface, I-Wire
Функція віддаленого керування та моніторингу (SNMP Card додатково)	Є
Функція моніторингу через мережу (GPRS Card додатково)	Є
Паралельне підключення	Так
коефіцієнт потужності	> 0,99
Максимальний коефіцієнт перетворення (DC/AC)	96%
Форма вихідного сигналу	Чистий синус
Максимальний коефіцієнт перетворення (DC/AC)	91%

При розрахунку та виборі потужності силового трансформатора керуються графіком середньодобового та повного активного навантаження підстанції, а також тривалістю максимального навантаження.

Якщо графік роботи підстанції характеризується короткочасним піковим режимом потужності – 30 хв або більше 1 години, то трансформатор працюватиме у недовантаженому режимі. Тому вигідніше підбирати трансформатор із потужністю, наближеною до тривалого максимального навантаження та повністю використовувати перевантажувальні можливості трансформатора з урахуванням систематичних перевантажень у нормальному режимі [20].

У реальних умовах значення припустимого навантаження визначається коефіцієнтом початкового завантаження. На вибір величини навантаження впливає температура навколишнього повітря, в якому знаходиться трансформатор, що працює.

Коефіцієнт завантаження завжди менше одиниці.

У ході досліджень було вивчено проаналізоване обладнання сухих силових трансформаторів.

Сухі литі трансформатори незахищеного виконання (IP00, без кожуха) виготовляються із вводами ВН та ПН, виконаними для під'єднання кабелем або шинами (гнучкими шинами). Трансформатори захищеного виконання виготовляються з введеннями ВН всередині кожуха для під'єднання кабелем, введення ж ПН можуть розташовуватися всередині кожуха для під'єднання кабелем або виведені на дах для приєднання шинами.

Трансформатори виготовляються із введеннями ПН, розташованими на бічній (вузькій) стороні зах. кожуха. Трансформатори комплектуються обмотками SIEMENS. Клас нагрівостійкості ізоляції - F.

Виходячи з цього було обрано обладнання аTSE 160 кВА. ВАТ «Група РУСЕНЕРГОРЕСУРС». Країна-виробник Словаччина, Торгова марка BEZ Transformatory (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд TSE 160 кВА 0,4/10 кВ IP 21 – 31 [20]

Стандартна комплектація включає:

- Трансформатор ВН – 10 кВ; ПБВ $\pm 2 \times 2.5\%$, ПН – 0,4 кВ; Δ/Y_n-11 , 50 Гц;
- Термодатчики РТС (6 шт.);
- Електронне термореле MSF220VU.

У проєктованій підстанції трансформатором також необхідно встановити силовий вимикач комутації мережі 10 кВ. Вимикачі необхідно вибирати за номінальним струмом. У ході досліджень було вивчено та проаналізовано обладнання.

Виходячи з цього було обрано вакуумний вимикач компанії «ТАВРИДА ЕЛЕКТРИК» типу ВВ/TEL-10-12,5-630А для всіх варіантів структурних схем (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Вакуумний вимикач [20]

Ключовим елементом функціональної схеми системи керування є система обробки інформації (контролер). Саме тому першу чергу потрібно визначитися з контролером. Контролер повинен виконувати всі покладені на нього функції, а також мати якомога меншу вартість, допустиму надійність, бути достатньо легким у програмуванні. За цими параметрами було прийнято рішення порівняти два типи контролерів: програмовані логічні контролери (ПЛК) та мікроконтролери.

ПЛК мають наступні переваги перед мікроконтролерами:

- Більша надійність. ПЛК можуть стабільно працювати в умовах підвищеної вологості, електричних перешкод, вібрацій та в інших несприятливих умовах, у яких мікроконтролер працювати не здатен зовсім.

- Простота програмування. ПЛК мають у своєму розпорядженні графічні мови програмування, такі як Functional Block Diagram та Ladder Diagram. Ці мови програмування дуже прості в засвоєнні, і навіть молодосвідчений спеціаліст може його запрограмувати;

- Простота обслуговування. ПЛК дуже просто перепрограмувати, якщо виникає така необхідність, і при цьому не порушується технічний процес.

- Високий рівень стандартизації. ПЛК дуже легко використовувати з різноманітними датчиками, сенсорами та приводами, їх легко монтувати на спеціальні рейки завдяки високому рівню стандартизації.

Мікроконтролери в свою чергу мають такі переваги:

- Низька вартість. Типовий мікроконтролер має вартість лише у декілька доларів, при тому що вартість ПЛК нерідко сягає сотень доларів.

- Малий розмір. Мікроконтролери займають дуже мало місця, що дозволяє монтувати їх у пристрої таким чином, що їх практично непомітно.

- Висока швидкість обробки інформації. Частота роботи ПЛК зазвичай більша, ніж 8 МГц, а може сягати 72 МГц та більше.

- Висока зносостійкість виходів. Виходами ПЛК являються реле, які не призначені для частотої та швидкої зміни стану. Насамперед виходи мікроконтролерів легко можуть змінювати свій стан багато разів за секунду.

Система, що розробляється, на потребує від контролера легкості монтажу, легкості обслуговування та такої великої надійності. Навпаки, деякі переваги ПЛК, такі як легкість програмування, є небажаними у системі, що розробляється, зовсім. При цьому усі наведені переваги мікроконтролерів є вагомими для системи, що розробляється. Таким чином, було прийнято рішення в якості системи обробки інформації використовувати мікроконтролер.

Оскільки популярні мікроконтролери мають велику кількість уже створених програм, драйверів, документації та мають підтримку суспільства, було прийнято рішення обирати мікроконтролер саме із найпопулярніших серій.

Основну долю ринку розділяють між собою мікроконтролери наступних серій:

- AVR;
- PIC;
- ARM Cortex.

Для порівняння було взято кілька популярних контролерів, які знаходяться приблизно в одній цінній категорії.

Порівняльна інформація наведена в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняльна інформація мікроконтролерів

Параметр	STM32F100 C4T6B	ATmega48 PA-PU	ATtiny13 A-SSU	PIC16 F505-I/SL
Середня ціна	\$0.42	\$0.78	\$0.42	\$0.49
Об'єм flash-пам'яті (ROM, пам'яті програм)	16 кБайт	4 кБайта	1 кБайт	1 кБайт
Об'єм оперативної пам'яті (RAM, пам'яті даних)	4096 Байт	512 Байт	64 Байта	72 Байта
Тактова частота	24 МГц	20 МГц	20 МГц	20 МГц

Ліній вводу/виводу	37	23	6	12
АЦП	16 каналів 12 біт	8 каналів 10 біт	4 каналу 10 біт	0
ЦАП	12-бітний	0	0	0
USART	2	1	0	0
SPI	1	1	1	0
I2C	1	1	0	0
Кількість таймерів	5	3	1	1
DMA	7 каналів	0	0	0

Як видно із таблиці 2.1, мікроконтролер STM32 за всіма параметрами перевершує інші мікроконтролери даної категорії. Окрім наведених у таблиці даних, також варто прийняти до уваги, що мікроконтролери ARM є 32-розрядними, що означає можливість роботи з 32-бітними даними за один такт процесора (для 8-бітних мікроконтролерів для цього потребується значно більша кількість тактів).

Ще однією особливістю використання мікроконтролерів STM32 є повна апаратна сумісність в межах одного корпусу, тобто якщо за якимось причинами не вистачає ресурсів закладеного до схеми мікроконтролера, завжди можна на його місце впаяти інший потрібний мікроконтролер. При цьому іноді може знадобитися лише невелика зміна програми, і таких змін в програмі, як правило, необхідно зробити значно менше, ніж наприклад при перенесенні програми з між мікроконтролерами AVR.

Для використання у дипломному проєкті було обрано версію мікроконтролера серії STM32: STM32F103C6.

Загальні характеристики даного мікроконтролера наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4– Характеристики мікроконтролера STM32F103C6

Параметр	Значення
Ядро	ARM Cortex-M3
Максимальна частота ядра	72 МГц
Об'єм пам'яті програм	32 кБайт
Тип пам'яті програм	FLASH
Об'єм оперативної пам'яті	10 кБайт
Кількість входів/виходів	37
Інтерфейси	CAN, I ² C, IrDA, LIN, SPI, UART/USART, USB
Периферія	DMA, Motor Control PWM, PDR, POR, PVD, PWM, Temp Sensor, WDT
АЦП / ЦАП	A/D 10x12b
Напруга живлення	2 - 3.6 В

Інформаційна взаємодія може відбуватися за допомогою інтерфейсу 1-Wire, який був розроблений у кінці 90х років фірмою Dallas Semiconductor, яка з 2001 року є частиною компанії Maxim Integrated. Цей інтерфейс регламентовано розробниками для застосування в чотирьох основних сферах-додатках:

- обслуговування пристроїв, які упаковані в спеціальні корпуси CAN f5 (раніше MicroCAN), для вирішення завдань ідентифікації, аутентифікації, авторизації, захисту інформації, контролю доступу, забезпечення електронних платежів, перенесення або перетворення інформації (технологія iButton);
- програмування вбудованої пам'яті інтегральних компонентів;
- ідентифікація елементів обладнання і захист доступу до ресурсів електронної апаратури;
- елементи і системи автоматизації (технологія 1-Wire-мереж).

Перший із цих напрямків, пов'язаний в тому числі з обслуговуванням пристроїв iButton, які дуже широко поширене в світі. Другий з успіхом забезпечує можливість легкої перебудови функцій напівпровідникових компонентів, вироблених компанією Maxim Integrated і мають малу кількість зовнішніх виводів. Третій дозволяє забезпечити недорогу, але досить ефективну ідентифікацію і надійний захист самого різноманітного обладнання. Що стосується четвертого застосування, то реалізація локальних розподілених систем на базі 1-Wire-мереж є оптимальним для багатьох практичних завдань автоматизації.

При роботі з додатками, де вихідний сигнал системи повинен змінюватися відповідно до опорного значення, потрібен алгоритм управління.

Протягом довгого часу в області управління використовувалося багато рішень, але ПІД-регулятори можуть стати "промисловим стандартом" через свою простоту і високу продуктивність.

2.4 Математична модель системи керування розподілом джерел енергозабезпечення

Одним із завдань системи керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства є визначення оптимального складу та параметрів системи з урахуванням реальних кліматичних умов експлуатації, характеристик обладнання, що використовується, а також особливостей споживача, включаючи очікувані змінні графіки споживання енергії.

Критерієм оптимальності для математичної моделі є мінімум витрат за електропостачання споживача. Визначуваними параметрами є оптимальні потужності модулів ВДЕ та ємності акумуляторних батарей.

Умовою забезпечення гарантованого електропостачання споживача є дотримання енергетичного балансу між виробленням та споживанням протягом усього терміну експлуатації. Слід зазначити, що для ВДЕ характерні

такі властивості, як переривчастість і періодичність, і водночас мала мінливість величини енергоресурсів рік у рік.

Тому під час постановки математичної моделі системи керування є складення енергетичного балансу, для якого оптимального розглядати період, рівний одному року.

Тоді вираз енергетичного балансу запишеться так:

$$P_{\text{заг}}^{\text{річ}} = P_{\text{пот}}^{\text{річ}} + P_{\text{вн}}^{\text{річ}} + P_{\text{втрати}}^{\text{річ}}$$

де $P_{\text{заг}}^{\text{річ}}$ - вироблення електричної енергії енергоустановками за рік, кВт-год;

$P_{\text{пот}}^{\text{річ}}$ - обсяг електричної енергії, який визначається потребами споживача, за рік, кВт-год;

$P_{\text{вн}}^{\text{річ}}$ - обсяг електричної енергії, що визначається власними потребами комбінованої системи протягом року, кВт-год;

$P_{\text{втрати}}^{\text{річ}}$ - обсяг електричної енергії, який визначається втратами в k-му елементі системи електропостачання, протягом року, кВт-год.

Загалом енергоресурси деяких ВДЕ постійні та добре прогнозуються лише за тривалі періоди часу, які рівні місяцю або року. При цьому необхідно відзначити, що потоки енергії цих джерел за місяць відносно постійні з року на рік тільки для певного місяця, а від одного календарного місяця до іншого значення цих ресурсів не постійні та змінюються у значних межах. Прогнозування на короткі періоди часу важке, тому що прихід енергії сонця та вітру залежить від багатьох факторів. Надходження сонячної радіації описується функцією від часу, що складається з детермінованої (день-ніч, місяць, рік, яка визначається геометрією Земля-Сонце) та випадкової (клімат, метеорологія) складових.

Споживач характеризується нерівномірним споживанням електричної енергії за короткі інтервали часу - добу, та відносно постійним споживанням за тривалі проміжки часу – місяць або рік. У зв'язку з цим такі установки

вимагають використання накопичувачів енергії, які здійснюють компенсацію (розподіл) енергії у зв'язку з нерівністю споживання та генерації шляхом акумулювання енергії в періоди її надлишку та видачі її в моменти дефіциту. Оскільки акумуляторні батареї здатні протягом тривалого часу зберігати електричну енергію (місяці), вони можуть застосовуватись і для сезонного вирівнювання вироблення та споживання.

Таким чином, при визначенні потужності генеруючих пристроїв, достатніх для забезпечення електропостачання споживача необхідно розглядати виконання енергетичного балансу з урахуванням використання АКБ на середньорічний, середньомісячний та середньогодинний періоди. Однак якщо при електропостачанні використовується кероване джерело або є підключення до електричної мережі, то АКБ вибираються по-іншому принципу і при оптимізації не розглядаються. Їхня головна мета в цьому випадку - забезпечити електричною енергією споживача у моменти часу малого навантаження. Однак їх слід враховувати надалі під час перевірки (моделювання) роботи системи.

Виконаємо розробку математичної моделі з урахуванням вищенаведеного.

Шукомі змінні – потужності енергоустановок на основі ВІЕ та ємність накопичувача в одному випадку, а також потужності енергоустановок в іншому (коли компенсація здійснюється не тільки за рахунок АКБ), які приймають певні значення, згідно з їх типорозмірним рядом.

Таким чином, в математичній моделі є n шукових змінних x_i ($i = 1, 2 \dots n$). Дискретні значення кожної змінної x , задані згідно з типорозмірним рядом використовуваного устаткування. До оптимального рішення має увійти λ змінних ($\lambda < n$).

Кожній змінній x відповідає двійкова змінна TM_i . Якщо в результаті розв'язання задачі TM_i , то змінна x_i входить до оптимального рішення; якщо $TM_i = 0$, то ні.

У цьому випадку цільова функція складається з дискретних та двійкових змінних:

$$Z(x_1, x_2 \dots x_n) \rightarrow \min.$$

Критерій оптимальності, тобто екстремум цільової функції – мінімум витрат.

Наступне обмеження, яке необхідно накласти на математичну модель - це знизити вартість споживаної електроенергії з мережі. Рахунки за електроенергію для споживача в заздалегідь заданому інтервалі $[0, T]$ представлені у вигляді:

$$E = \int_0^T (\alpha_{gs} P_{gs}(t) - \alpha_{sg} P_{sg}(t)) dt, \quad (2.1)$$

де α_{gs} і α_{sg} - коефіцієнти, що представляють ціну на перетікання електроенергії в мережу та з неї відповідно.

Ці ціни змінюються залежно від законодавства кожної країни. Для України приймемо $\alpha_{gs} = \alpha_{sg} = 1$.

На рівні навантаження потік енергії з мережі дорівнює $\eta_{gs} P_{gs}(t)$, де η_{gs} - ККД ланцюга переходу від мережі до навантаження. Точно так само потік енергії, що передається в мережу від джерел і, зрештою, від батареї, становить $\eta_{sg} P_{sg}(t)$, де η_{sg} – ККД ланцюга перемикавання від навантаження до мережі. На передачу енергії в ланцюзі, до якого входить акумулятор, також впливає ефективність акумулятора, η_b .

Важливою змінною, яка не є «видимою» в рівнянні (2.4), є зміна енергії, запасеної в батареї.

Система управління розподіленою системою може впливати на $P_{gs}(t)$ або $P_{sg}(t)$ в рівнянні (2.2), впливаючи на накопичену енергію.

По суті, на змінну E впливають три фактори: потужність, що виробляється відновлюваними джерелами енергії; навантаження; та команда, що подається системою керування, яка визначає зміну енергії, запасеної в батареї.

Щоб підтримувати завантаження мережі в прийнятному діапазоні, першу мету було визначено шляхом утримання завантаження мережі в критичних межах:

$$S_c^{gen} \leq S \leq S_c^{cons}. \quad (2.2)$$

Крім того, щоб мати справедливий розподіл між декількома ESS, друга мета системи керування визначається таким співвідношенням:

$$\frac{P_1}{P_1^{макс}} = \frac{P_2}{P_2^{макс}} = \dots = \frac{P_n}{P_n^{макс}}.$$

Якщо критичні обмеження для виробництва чи споживання порушуються, кожне ДЗЕ починає оновлювати свій інформаційний стан, як зазначено в рівняннях (2.3) і (2.4):

$$\varepsilon_0[t] = \varepsilon_0[t - t_s] + k(S[t] - S_c^{gen}); \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_0[t] = \varepsilon_0[t - t_s] + k(S[t] - S_c^{cons}). \quad (2.4)$$

Щойно контролер ініціює керування, ДЗЕ оновлюють свій інформаційний стан на основі алгоритму консенсусу згідно з рівнянням:

$$\varepsilon_i[t] = \sum_{j \in N_i} d_{ij} \varepsilon_j[t].$$

Ґрунтуючись на обчисленій інформації про стан ДЗЕ, значення для необхідної потужності ДЗЕ буде оновлено за наступною формулою:

$$P_i[t] = \varepsilon_i[t]P_i^{\text{макс}}.$$

Інший важливий критерій, що розглядається для управління розподіленою системою, - це збільшення терміну служби батареї i , таким чином, підвищення стійкості системи.

Висока вартість батареї і той факт, що її термін служби залежить від умов експлуатації, виправдовують вимогу до системи керування, щоб забезпечити якомога більший термін служби батареї.

Першим варіантом може бути забезпечення циклу зарядки та розрядки з номінальною швидкістю. Оскільки потужність, що виробляється відновлюваними джерелами енергії, і споживання мережі є випадковими величинами, цей підхід може призвести до великих рахунків за електроенергію через рівняння (2.1).

Другий варіант може полягати у запровадженні режиму, який знижує вартість рахунків за електроенергію.

Однак такий підхід може призвести до високої частоти в перемикачах заряджання-розряджання акумулятора, що негативно позначається на терміні служби батареї.

Щоб продовжити термін служби батареї, швидкість заряджання/розряджання повинна бути на низькому рівні.

Крім того, щоб захистити батарею, важливо уникати глибоких розрядів, а батарею необхідно підтримувати в умовах номінального навантаження.

Нехай N_T^ε - число перемикачів заряду / розряду, які знаходяться в інтервалі $[0 T]$, в той час як батарея підтримується зарядженою на номінальне значення з допуском ε .

Підтримка напруги батареї в області номінального стану навантаження може виконуватися за допомогою системи управління, яка забезпечує

адекватний потік енергії в розподілену систему (з урахуванням випадковості навантаження та відновлюваних джерел енергії) відповідно до вимог, які пред'являються критерієм ефективності.

Цей критерій враховує дві вимоги: скорочення рахунків за електроенергію, E , і кількість перемикачів заряду / розряду, N_T^e і формула (2.2) набуває вигляду:

$$I = \int_0^T (\alpha_{gs} P_{gs}(t) - \alpha_{sg} P_{sg}(t)) dt + \gamma N_T^e,$$

де γ - це фактор, що зважує два члени критерію ефективності.

Цей чинник залежить від вартості перетікання електроенергії в мережу та з неї, ефективності передачі між джерелами та мережею, а також від властивостей накопичувача.

Важливою особливістю енергорозподілених систем є високочастотні коливання потужності, що подається джерелом вітру (через турбулентну складову швидкості вітру), а іноді й потужності, що споживається, навантаження.

Ці коливання можуть викликати часті перемикання між режимами заряджання/розрядки в контурі керування напругою батареї, що негативно впливає на термін служби батареї.

Критерій оптимальності математичної моделі з урахуванням вищенаведеного можемо переписати наступним чином:

$$\begin{aligned} & c_{\text{ФЕУ}} N_{\text{ФЕУ}1}^{\text{ВСТ}} + c_{\text{ФЕУ}} N_{\text{ФЕУ}2}^{\text{ВСТ}} + \dots + c_{\text{ФЕУ}} N_{\text{ФЕУ}i}^{\text{ВСТ}} + \\ & + c_{\text{ВЕУ}} N_{\text{ВЕУ}1}^{\text{ВСТ}} + c_{\text{ВЕУ}} N_{\text{ВЕУ}2}^{\text{ВСТ}} + \dots + c_{\text{ВЕУ}} N_{\text{ВЕУ}}^{\text{ВСТ}} + \\ & + c_{\text{АБ}} C_{\text{АБ}1}^{\text{ВСТ}} + c_{\text{АБ}} C_{\text{АБ}2}^{\text{ВСТ}} + \dots + c_{\text{АБ}} C_{\text{АБ}}^{\text{ВСТ}} \rightarrow \min, \end{aligned}$$

де $c_{\text{ФЕУ}}, c_{\text{ВЕУ}}$ - питома вартість Вт встановленої потужності ФЕУ, ВЕУ, відповідно, грн./Вт;

C_{AB} - питома вартість встановленої ємності АБ при напрузі $U_{AB}^{НОМ}$, В за весь термін експлуатації, грн./Агод;

$N_{ФЕУ1}^{ВСТ}$, $N_{ВЕУ1}^{ВСТ}$... - відповідні типорозмірному ряду обладнання встановлені потужності ФЕУ, ВЕУ відповідно, Вт;

$C_{AB1}^{ВСТ}$... - встановлені ємності АКБ при напрузі $U_{AB}^{НОМ}$, А год.

Коефіцієнти визначаються виходячи з кліматичних умов експлуатації обраної місцевості та характеристик використовуваного устаткування.

Граничні умови не записуються, оскільки можливі значення дискретних змінних є заданими, а значення дискретних змінних може бути лише 0 чи 1. За такої формалізації не можна стверджувати про точність отриманих результатів, оскільки враховуються деякі чинники.

По-перше, коефіцієнт глибини розряду (використання енергії) АКБ залежить від необхідної енергії та визначає видавану розрядну ємність АБ.

По-друге, неточність уявлення АКБ у виразі як самостійного джерела енергії необхідно враховувати з запровадженням додаткового обмеження.

Воно формується виходячи з того, що АБ є джерелом енергії, вироблення якого безпосередньо залежить від вироблення модулів, що генерують, на основі ВДЕ.

Тоді середньорічне вироблення енергоустановками на основі ВДЕ має перевищувати необхідне середньорічне навантаження з урахуванням коефіцієнта втрат на компенсацію електричної енергії, тобто, втрат у АКБ. Але при цьому складно точно оцінити величину компенсованої енергії.

Таким чином, у зв'язку з вищевикладеними факторами рішення призводить до неточних результатів, тому прийнято рішення визначати оптимальний склад та параметри керування методом послідовних ітерацій.

Розрахунковий метод полягає у покроковій перевірці рівнянь математичної моделі, створених для середньої добової години кожного календарного місяця всього розрахункового періоду з урахуванням накопичення енергії АКБ:

$$k_{\text{ФЕУ}}^{\text{ВИК}}(\Delta t_i^j) N_{\text{ФЕУ}}^{\text{ВСТ}} k_{\text{п}} \Delta t_i^j + k_{\text{БЕУ}}^{\text{ВИК}}(\Delta t_i^j) N_{\text{БЕУ}}^{\text{ВСТ}} k_{\text{п}} \Delta t_i^j \pm C_{\text{АБ}}^{\text{T}}(\Delta t_i^j) U_{\text{АБ}}^{\text{НОМ}} k_{\text{п}} \geq W_{\text{н}}(\Delta t_i^j), (2.12)$$

де:

$$+C_{\text{АБ}}^{\text{T}}(\Delta t_i^j) U_{\text{АБ}}^{\text{НОМ}} = k_{\text{АКБ}}^{\text{РОЗР}}(\Delta t_i^j) C_{\text{АКБ}}^{\text{НАК}}(\Delta t_{i-1}^j) k_{\text{АКБ}}^{\text{ЗМ}}(\Delta t_i^j) U_{\text{АБ}}^{\text{НОМ}},$$

$$|-C_{\text{АБ}}^{\text{T}}(\Delta t_i^j) U_{\text{АБ}}^{\text{НОМ}}| \leq k_{\text{АКБ}}^{\text{ЗАР}} C_{\text{АБ}}^{\text{ВСТ}} U_{\text{АБ}}^{\text{НОМ}} \eta_{\text{АБ}},$$

де $C_{\text{АКБ}}^{\text{НАК}}(\Delta t_{i-1}^j)$ – накоплена в попередній момент часу енергія АКБ, Агод;

$k_{\text{АКБ}}^{\text{ЗМ}}$ – коефіцієнт, що характеризує зміну ємності АБ залежно від поточного розрядного струму, що визначається коефіцієнтом розряду, який, в свою чергу, визначається виходячи з необхідної компенсації енергії;

$\eta_{\text{АБ}}$ – ККД акумуляторних батарей.

Оскільки зазвичай наводять лише ККД всього зарядно-розрядного циклу, він враховується один раз при зарядці.

Накопелна в попередній момент часу енергія АКБ визначається як:

$$C_{\text{АКБ}}^{\text{НАК}}(\Delta t_{i-1}^j) = \mp 1 \pm C_{\text{АБ}}^{\text{T}}(\Delta t_{i-1}^j) + C_{\text{АБ}}^{\text{НАК}}(\Delta t_{i-2}^j).$$

Під час перевірки кожного кроку враховується загальна кількість енергії, яку АБ здатні накопичити за проміжок часу:

$$\sum C_{\text{АКБ}}^{\text{НАК}}(\Delta t_{i-1}^j) U_{\text{АБ}}^{\text{НОМ}} \leq C_{\text{АКБ}}^{\text{ВСТ}} U_{\text{АБ}}^{\text{НОМ}} k_{\text{АКБ}}^{\text{ГР}}.$$

Перевірці підлягають усі можливі комбінації розподілу потужності з урахуванням заданого типорозмірного ряду устаткування, що використовується в ній.

Знайдені таким чином параметри елементів системи керування розподілом ДЗЕ є узагальненими, оскільки в них використовуються середні значення, що визначають вирази спрощеними.

Тому після їх визначення доцільно провести моделювання роботи протягом усього розрахункового періоду: - проаналізувати її функціонування; перевірити оптимальні параметри; внести коригування.

Більш того, для вирішення задачі оптимізації потрібні коефіцієнти використання енергоустановок, що характеризують кліматичні умови обраної місцевості, а також характеристики використовуваного обладнання.

Таким чином, загальна методика визначення оптимального складу та параметрів АСК ДЗЕ виглядає так:

1. За допомогою математичної моделі визначаються коефіцієнти використання енергоустановок за інтервал часу, що дорівнює середньодобовій годині кожного календарного місяця розрахункового періоду (року);

2. Розрахунковим методом визначається попередній оптимальний склад та параметри системи;

3. За допомогою математичної моделі системи дані перевіряються та, при необхідності, коригуються.

Перевагою розробленого методу є те, що він дозволяє розподілити оптимальні варіанти у порядку зростання їх вартості. Це дозволяє надалі при негативному результаті перевірки попередніх оптимізаційних даних відразу ж переходити до наступного варіанта.

2.5 Висновки до розділу 2

Автоматична система керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства складається з наступних блоків: ФЕУ; ВЕУ; мережа; АКБ; силовий комутатор (СК); узгоджуючі пристрої;

баластний пристрій (БП); буфер; інвертор; навантаження змінного струму (споживач); блок контролю і прогнозування.

Вся система керування розділена на чотири групи: блоки генерації енергії, перетворювально-розподільні блоки, споживач та система контролю і прогнозування.

До блоків генерації належать: ФЕУ, ВЕУ, потужність мережі 10кВ та АКБ. Є два некерованих первинних перетворювача (ФЕУ та ВЕУ); один «квазі-керований» (накопичувач) та одне кероване джерело (АКБ), що забезпечує безперебійне електроживлення споживача.

Перетворювально-розподільні блоки - це елементи силової електроніки, взаємопов'язані «мікромережею» постійного струму, що виконують функції перетворення, розподілу та регулювання електричної енергії.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛОМ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДПРИЄМСТВА

3.1 Вибір та обґрунтування середовища моделювання

В межах даного розділу роботи виконаємо дослідження системи керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства у середовищі імітаційного моделювання.

Проектування сучасних систем керування неможливо без використання математичного моделювання, що пояснюється, насамперед, складністю промислових об'єктів.

При цьому широке поширення придбали математичні пакети, серед яких одним з найвідоміших і пристосованих для інженерних потреб є середовище MATLAB.

До складу MATLAB входять кілька пакетів розширення (Toolboxes), що призначені для рішення завдань керування та імітаційного моделювання, зокрема Control System Toolbox і Simulink. Control System Toolbox працює з безперервними та дискретними моделями систем у вигляді передаточних функцій, а також з моделями у просторі станів і дозволяє вирішувати як класичні завдання, так і завдання сучасної теорії керування: розраховувати динамічні та частотні характеристики; проектувати регулятори частотними та кореневими методами; синтезувати оптимальні системи керування; вирішувати стаціонарні рівняння Ляпунова, Риккаті та ін.

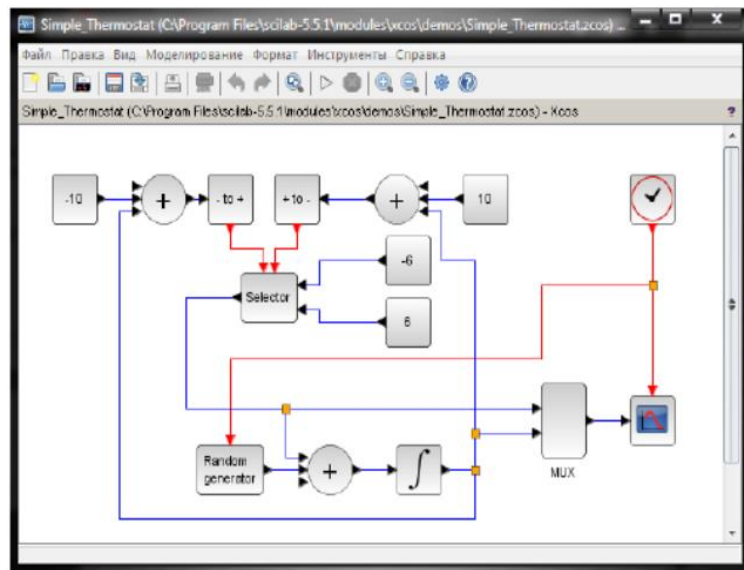
Xcos – це програма, яка входить до складу системи математичного моделювання Scilab і надає розробникам можливості проектування систем в області автоматики, механіки, гідравліки й електроніки, а також систем масового обслуговування.

Xcos є графічним інтерактивним середовищем, в основі якого лежить блочне моделювання.

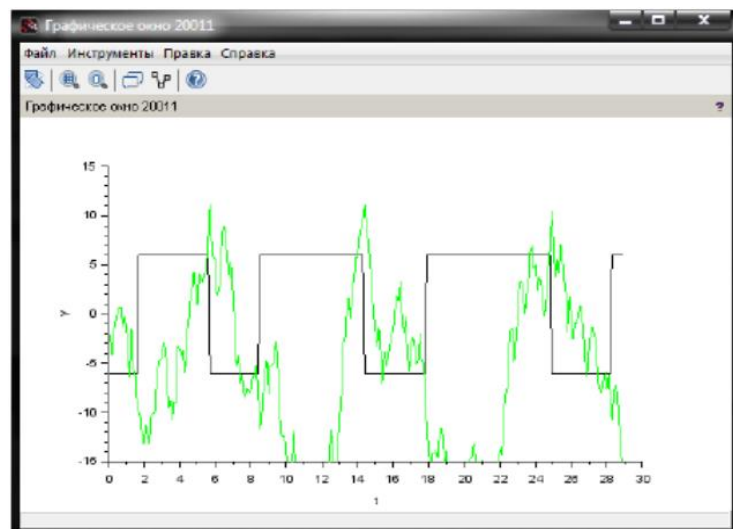
Додаток призначений для вирішення завдань динамічного і ситуаційного моделювання систем, процесів, пристроїв, а також тестування та аналізу цих систем.

При цьому модельований об'єкт (система, пристрій, процес) представляється графічно своєю функціональною схемою, що включає блоки елементів системи і зв'язки між ними.

Приклад основних вікон показано на рисунку 3.1.



а)



б)

Рисунок 3.1 - Робочі вікна Xcos: а) Приклад Xcos-моделі б) Результати її роботи

Пакет Xcos вважається одним з кращих пакетів з відкритим кодом для моделювання блочно заданих (агрегатних) моделей динамічних систем і є графічним інтерактивним середовищем, за допомогою якого можна робити імітацію, тестування, аналіз динамічних систем.

За допомогою Xcos можна створювати системи управління, системи обробки сигналів, системи зв'язку, моделі будь-яких динамічних систем.

Xcos створений розробниками Scilab і відрізняється від Scilab тим, що Scilab – це перш за все високорівнева мова програмування з відповідною оболонкою, а Xcos – це система графічного моделювання на основі блок-схем, яка складається з попередньо скомпільованих бібліотек.

Для представлення процесів і сигналів можна використовувати різні блоки візуалізації.

У системі модельований об'єкт (система, пристрій, процес) представляється блок-схемою, що включає блоки елементів системи і зв'язку між ними. Функціональні блоки елементів модельованої системи можуть, в свою чергу, представляти вкладені підсистеми зі своєю організацією, утворюючи ієрархічні структури.

Блоки, що включаються в створювану модель, можуть бути пов'язані один з одним як за інформацією, так і по управлінню.

За інформаційним з'єднанням передаються дані, а по керуючим – сигнали активації. Блоки також можуть мати інформаційні та керуючі входи і виходи.

Як правило, інформаційні входи і виходи блоків розташовуються зліва і праворуч від зображення блоку, а керуючі зверху і знизу. Тип зв'язку залежить від блоку і логіки роботи моделі. Дані, якими обмінюються блоки, можуть бути скалярними величинами, векторами або матрицями довільної розмірності (рисунок 3.2).

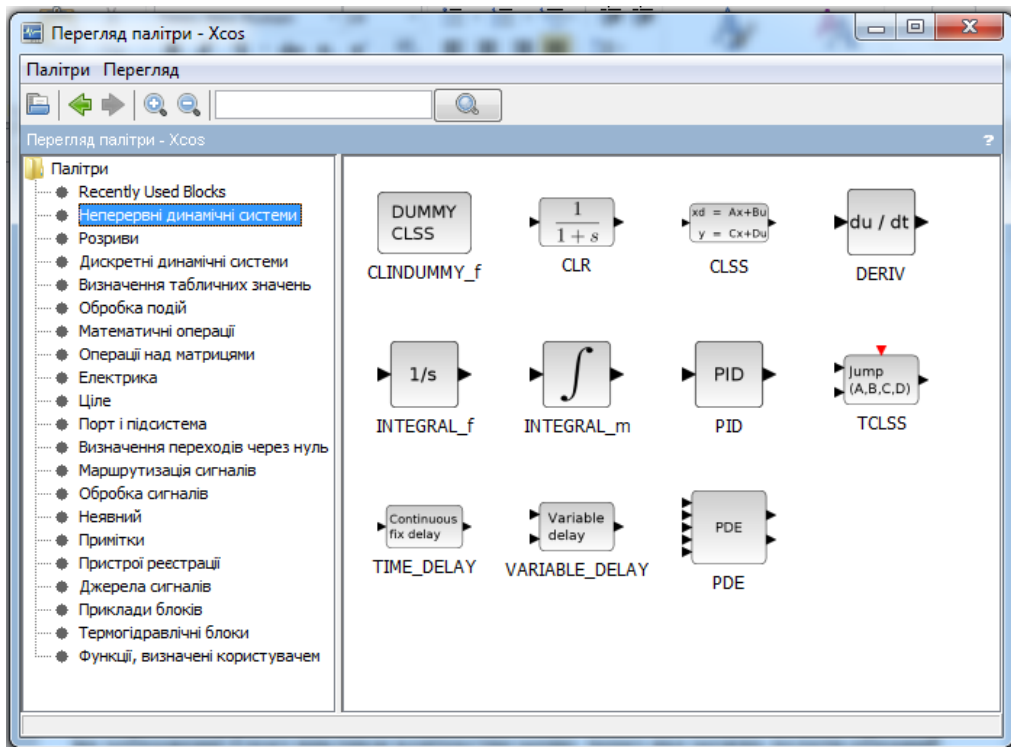


Рисунок 3.2 – Перегляд палітри блоків

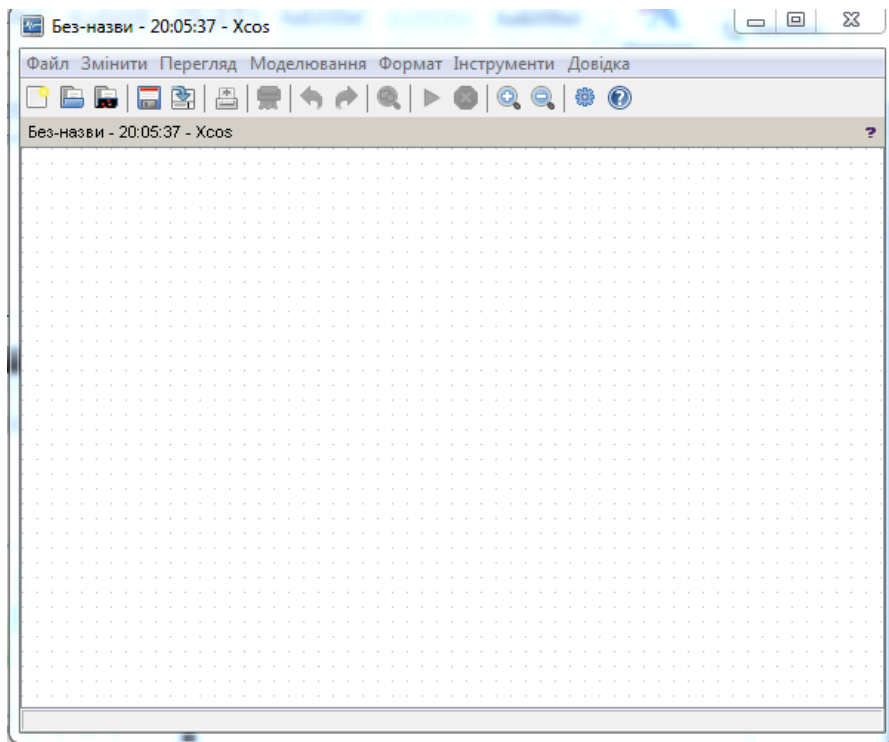


Рисунок 3.3 – Вікно редактора

Потужним засобом дослідження та синтезу динамічних систем є середовище візуального моделювання Simulink.

Для найбільш ефективного використання MATLAB при аналізі та синтезі систем автоматичного керування необхідно вміти працювати з усіма спеціалізованими пакетами розширення, які вигідно доповнюють один одного. Зрозуміло, що використання цих пакетів неможливо без володіння навичками роботи в MATLAB.

MATLAB – це одна із найбільш досконалих, ретельно опрацьованих та перевірених часом систем автоматизації математичних розрахунків, побудована на розширеному представленні і використанні матричних операцій.

Однією з найважливіших задач системи завжди було представлення користувачам потужної мови програмування, орієнтованої на технічні та математичні розрахунки і здатного перевершити можливості традиційних мов програмування.

При цьому особлива увага приділялась як підвищенню швидкості обчислень, так і адаптації системи до рішення найрізноманітніших задач користувачів [21-23].

Важливою перевагою системи MATLAB є її відкритість.

Система MATLAB поставляється сумісно з основним розширенням SIMULINK, яке забезпечує візуально – орієнтовану підготовку імітаційних моделей систем різноманітного призначення.

Модель може мати ієрархічну структуру, тобто складатися з моделей більш низького рівня, при чому число рівнів ієрархії практично необмежено.

В порівнянні з іншими параметрами моделювання, користувач може задавати спосіб зміни модельного часу (з постійним або перемінним кроком), а також умови закінчення моделювання.

В ході моделювання мається можливість спостерігати за процесами, що протікають в системі.

Характеристики, які цікавлять користувача можуть бути представлені як в числовій, так і в графічній формі. Крім того, існує можливість включення до складу моделі засобів анімації.

Таким чином, за допомогою розширення пакету MATLAB, а саме SIMULINK, можна сформувати імітаційну модель АСУ.

Основними перевагами даного середовища можна вважати наступні:

- можливість аналізу моделі в реальному масштабі часу, з постійним або дискретним кроком моделювання;
- зручний та не дуже складний інтерфейс додатку для роботи з елементами моделі та з моделлю в цілому;
- наявність широкої палітри інструментів та конструктивних блоків для побудови та дослідження моделі;
- досить простий спосіб конструювання моделі шляхом перетягування компонентів в робочу область;
- можливість побудови моделі з використанням методу Монте – Карло, тобто реакцій на впливи випадкового характеру;
- забезпечення зручного та наглядного візуального контролю за поведінкою, створеної користувачем віртуальної системи;
- можливість формування «вкладеності» вершин, тобто представлення їх незалежними підсистемами [23].

Інтерфейс системи представлений на рисунку 3.4.

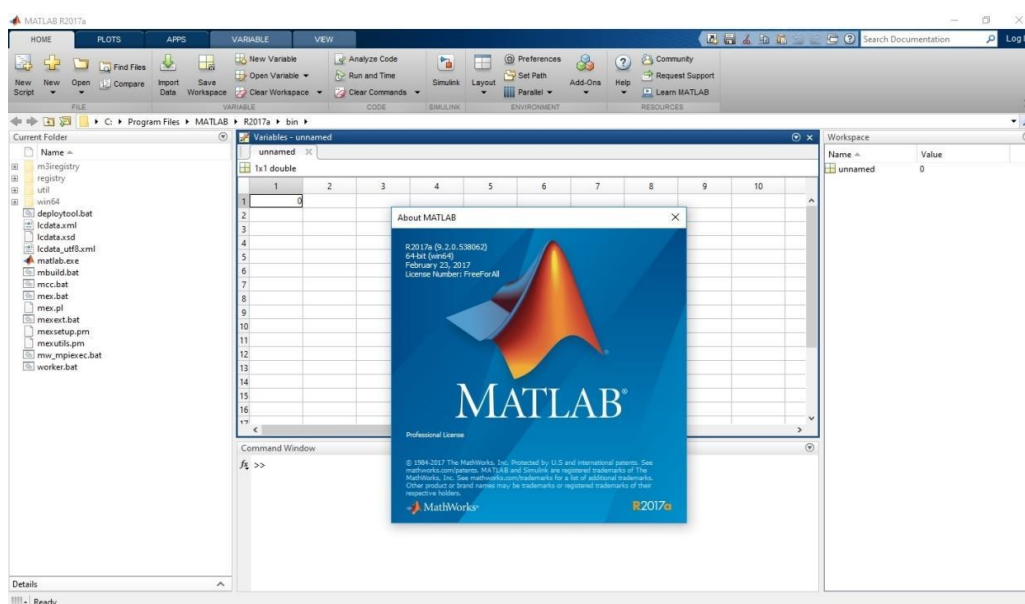


Рисунок 3.4 – Інтерфейс системи Matlab R 2017a

Важливою перевагою використання програми MATLAB є можливість переглядати і наочно коригувати графіки.

Більшість програм моделювання позбавлені цієї важливої функції.

Враховуючи кінцеву мету, вибір зупинимо на середовищі моделювання Matlab/Simulink.

3.2 Моделювання і аналіз отриманих результатів. Порівняння з існуючими рішеннями та економічна доцільність запропонованого рішення

З урахуванням вищенаведеного, виконаємо дослідження системи керування джерелами енергозабезпечення підприємства. Система наведена на рисунку 3.5.

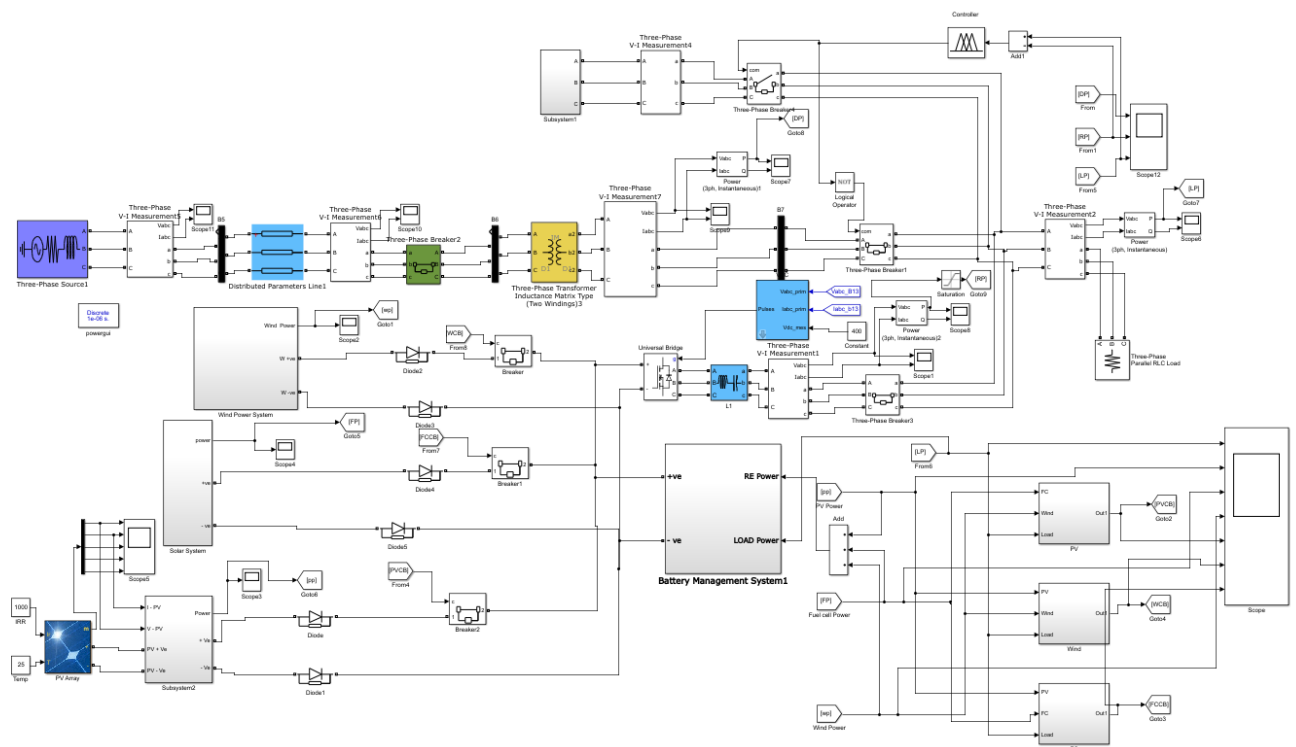


Рисунок 3.5 – Імітаційна модель системи керування в Matlab/Simulink

Структурна блок-схема складається з наступних блоків: ФЕУ; ВЕУ; мережа; АКБ; силовий комутатор (СК); узгоджуючі пристрої; баластний

пристрій (БП); буфер; інвертор; навантаження змінного струму (споживач); блок контролю і прогнозування.

Схема блоку ВЕУ представлена на рисунку 3.6.

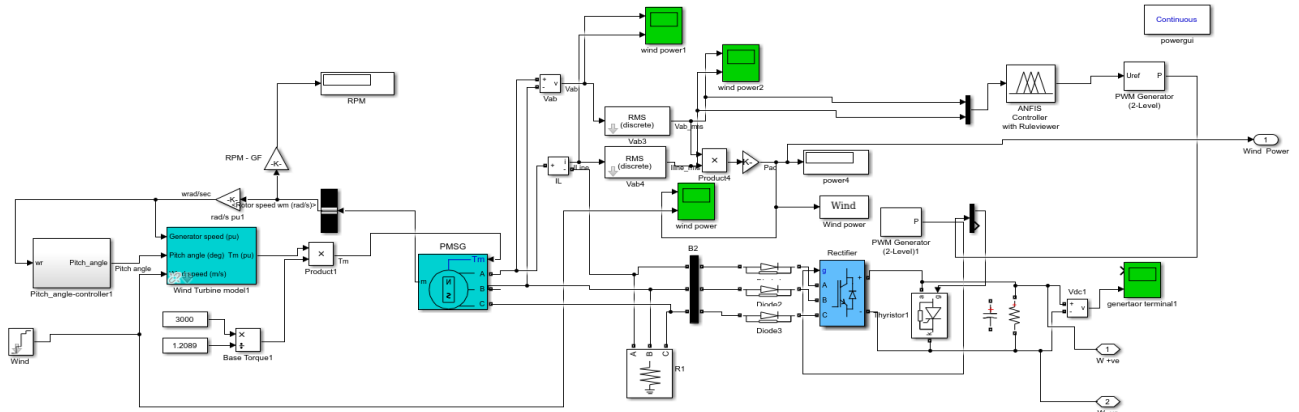


Рисунок 3.6 – Схема блоку ВЕУ

Схема блоку «Мережа» наведена на рисунку 3.7.

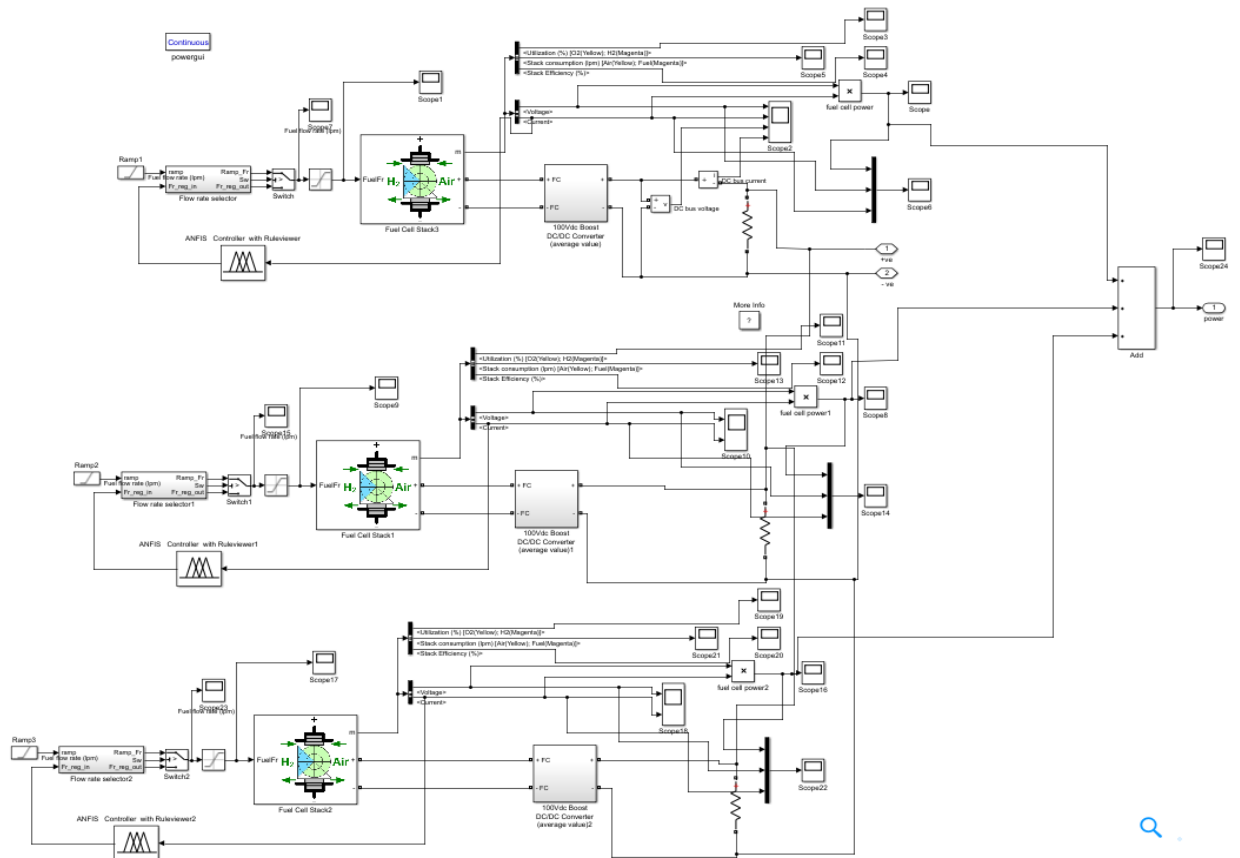


Рисунок 3.7 – Схема блоку «Мережа» з узгоджуючими пристроями

Схема блоку «ФЕУ» наведена на рисунку 3.8.

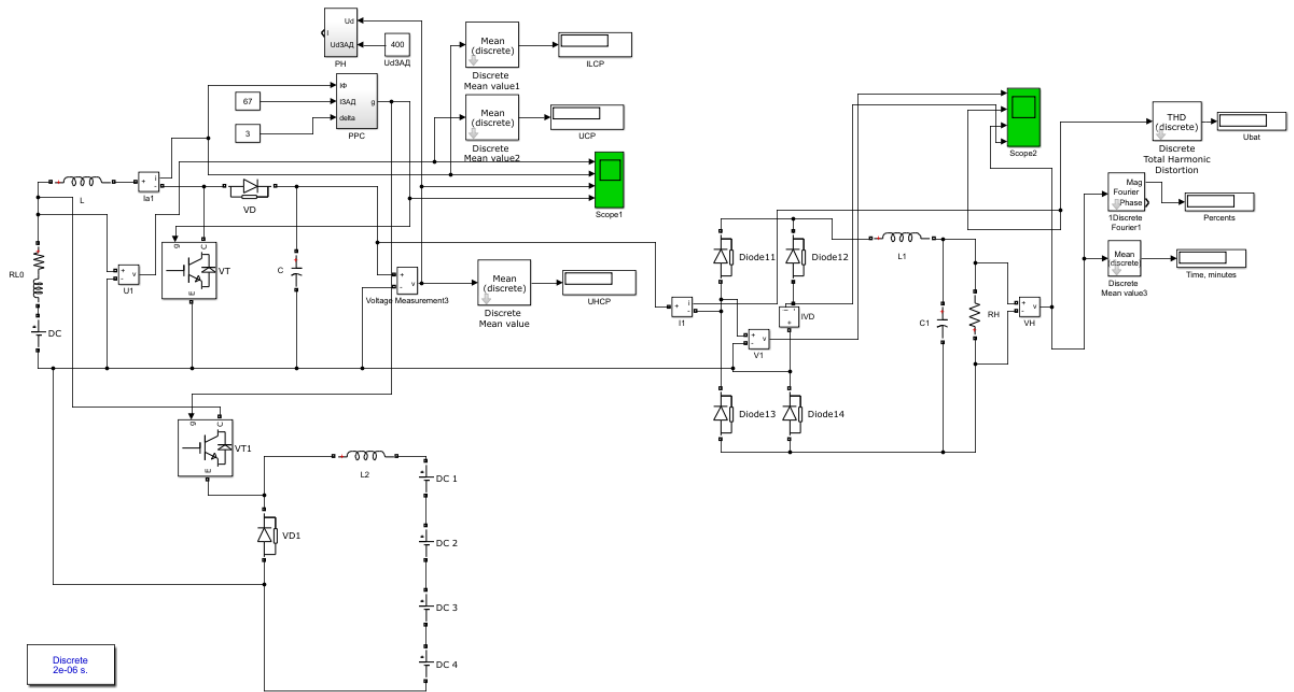


Рисунок 3.8 – Схема блоку «ФЕУ»

Схема блоку «Блок контролю і прогнозування» наведений на рисунку 3.9.

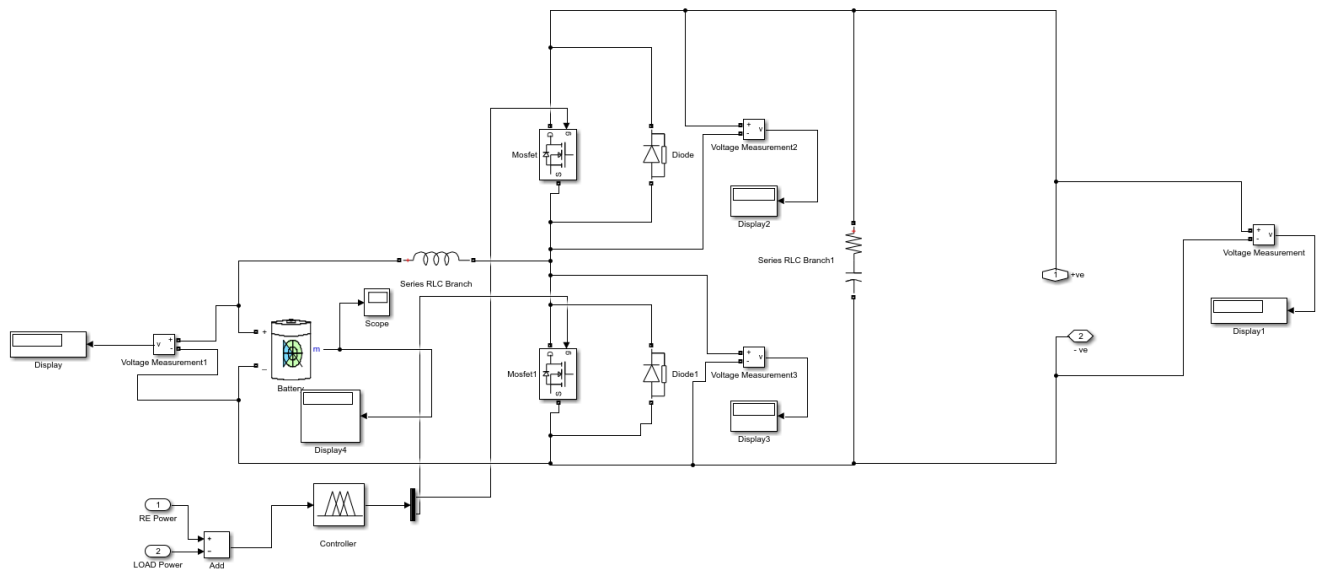


Рисунок 3.9 – Схема блоку «Блок контролю і прогнозування»

Блок виводу результатів імітаційного моделювання представлений на рисунку 3.10.

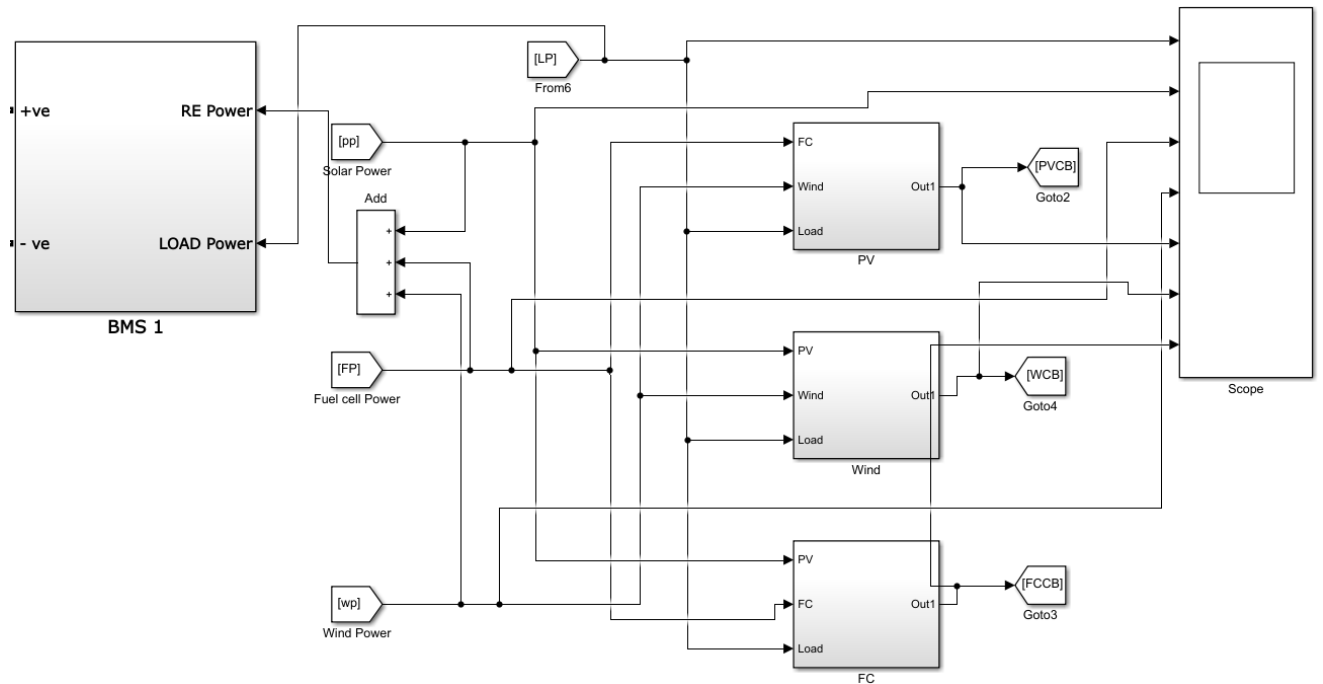


Рисунок 3.10 – Блок виводу результатів імітаційного моделювання

Схема силового комутатора наведена на рисунку 3.11.

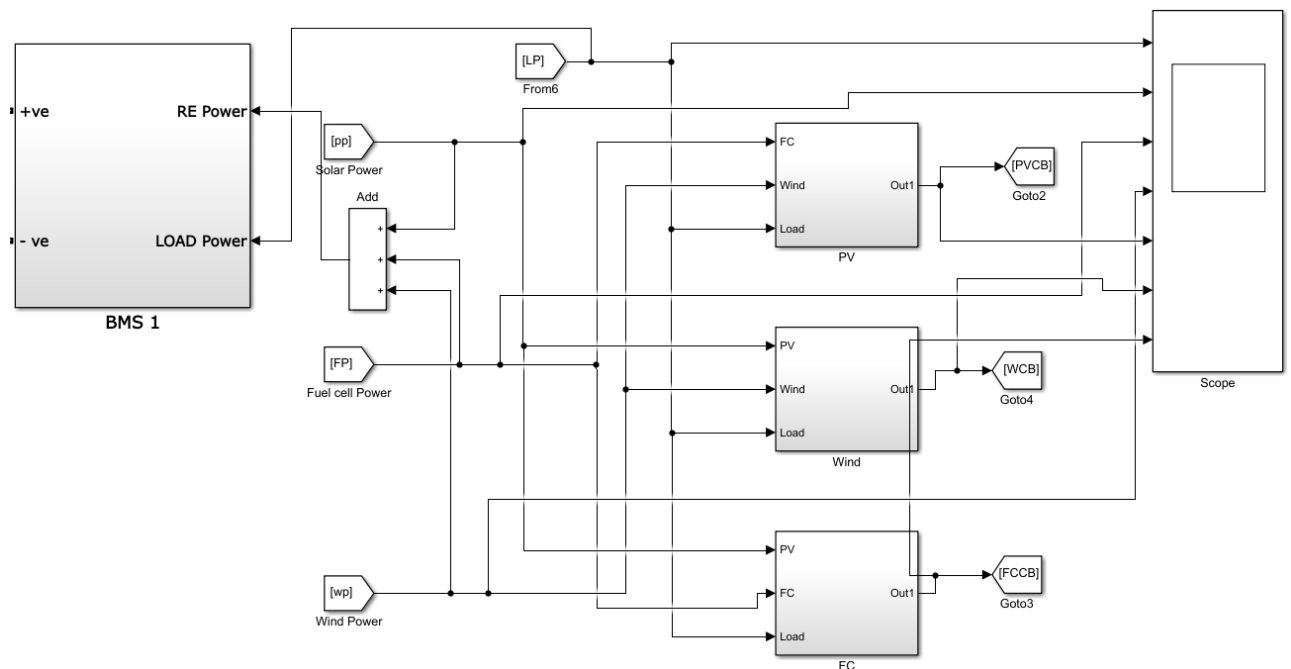


Рисунок 3.11 – Схема силового комутатора

В якості вихідних даних було обрано параметри ВДЕ, які попередньо були обрані у другому розділі роботи.

В якості вихідних даних з навантаження заводу приймемо дані, які представлені у вигляді таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Графік навантажень заводу

Значення Потужності, МВт	Тривалість	
	Годин	Діб
8	t1=356 год	14,33
6,4	t2=730 год	30,44
6	t3=356 год	14,33
5,12	t4=374 год	15,6
4,8	t5=374 год	15,6
4	t6=356 год	14,33
3,2	t7=730 год	30,44
2,56	t8=374 год	15,6
2,4	t9=1068 год	44,54
2	t10=356 год	14,33
1,92	t11=1122 год	48,04
1,6	t12=730 год	30,44
1,28	t13=374 год	15,6
1,2	t14=712 год	29,69
0,96	t15=748 год	31,19

Зимовий та літній графік навантаження представлені на рисунку 3.12 і рисунку 3.13.

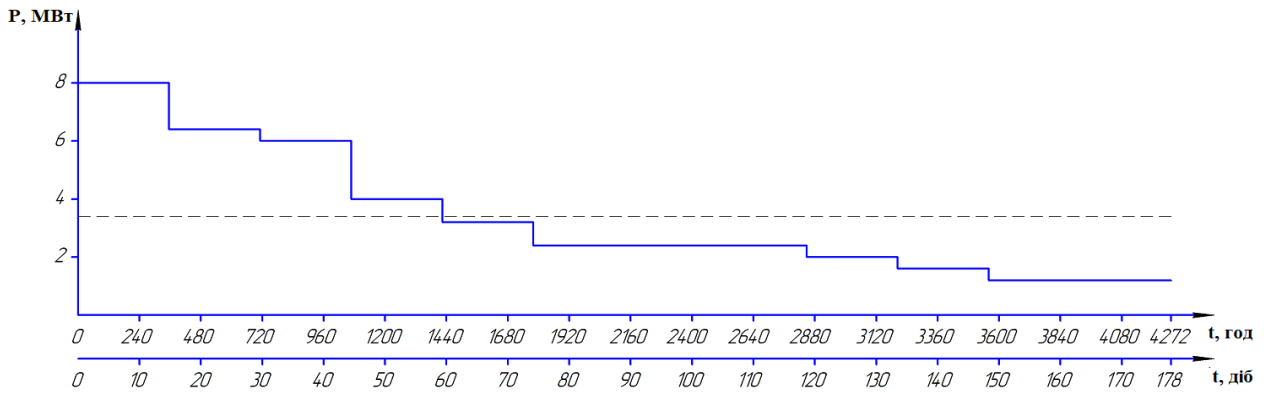


Рисунок 3.12 – Зимовий графік навантаження заводу

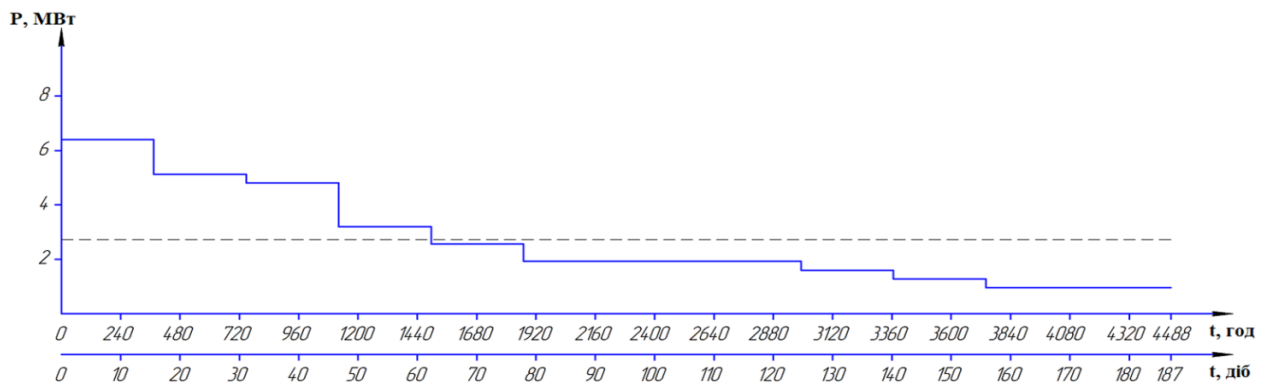


Рисунок 3.13 – Літній графік навантаження заводу

Результати моделювання наведені на рисунках нижче.

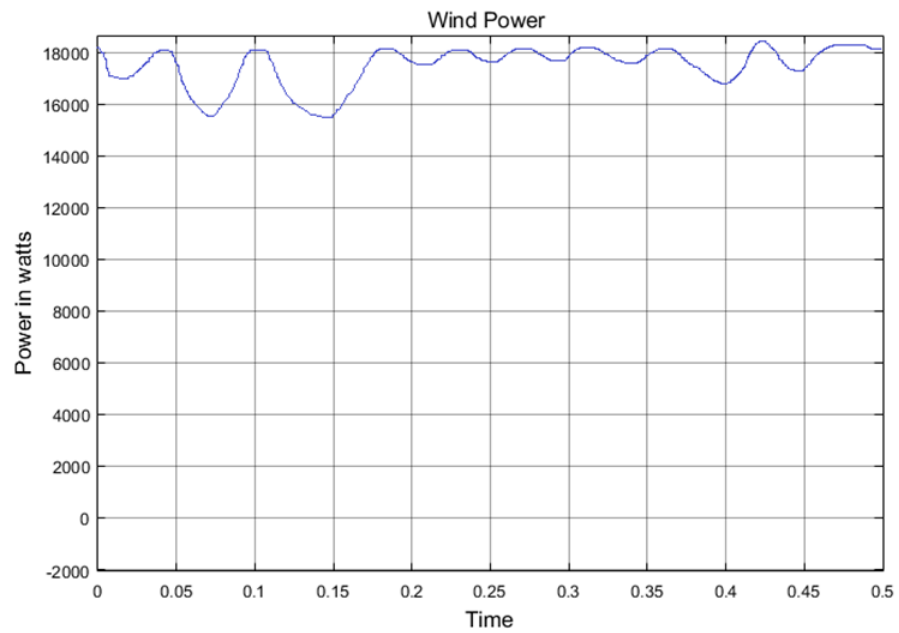


Рисунок 3.14 – Результати моделювання для ВЕУ (зима)

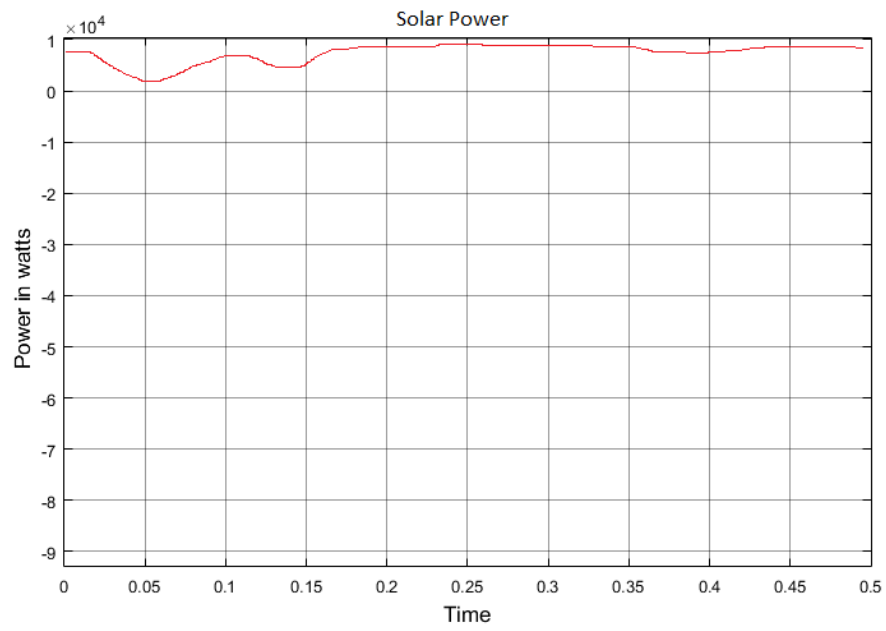


Рисунок 3.15 – Результати моделювання для ФЕУ (зима)

Результати моделювання для АКБ представлені на рисунку 3.16.

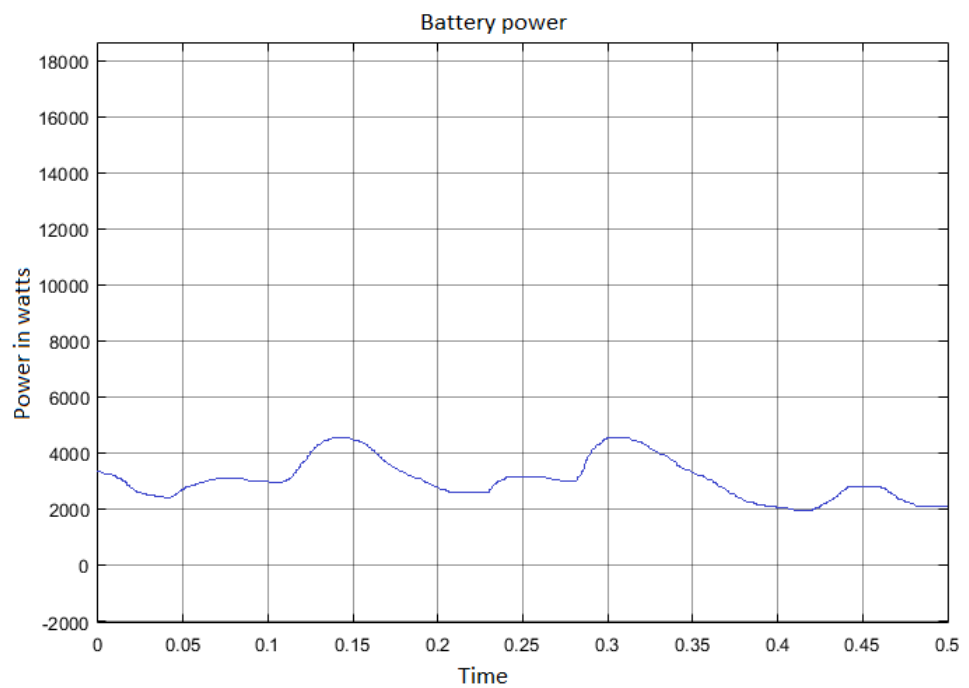


Рисунок 3.16 – Результати моделювання для АКБ (зима)

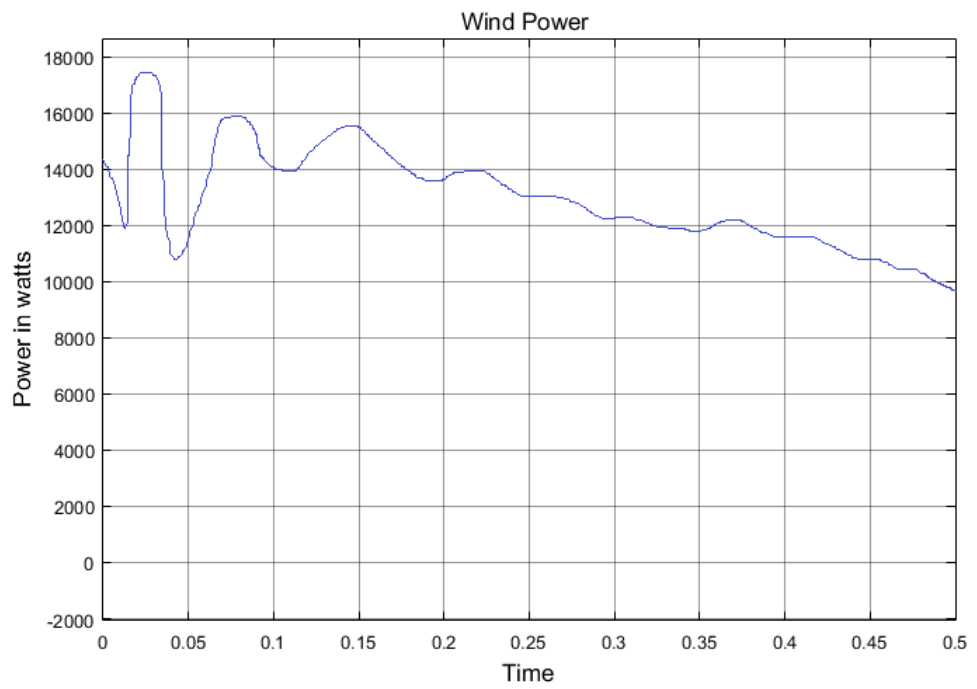


Рисунок 3.17 – Результати моделювання для ВЕУ (літо)

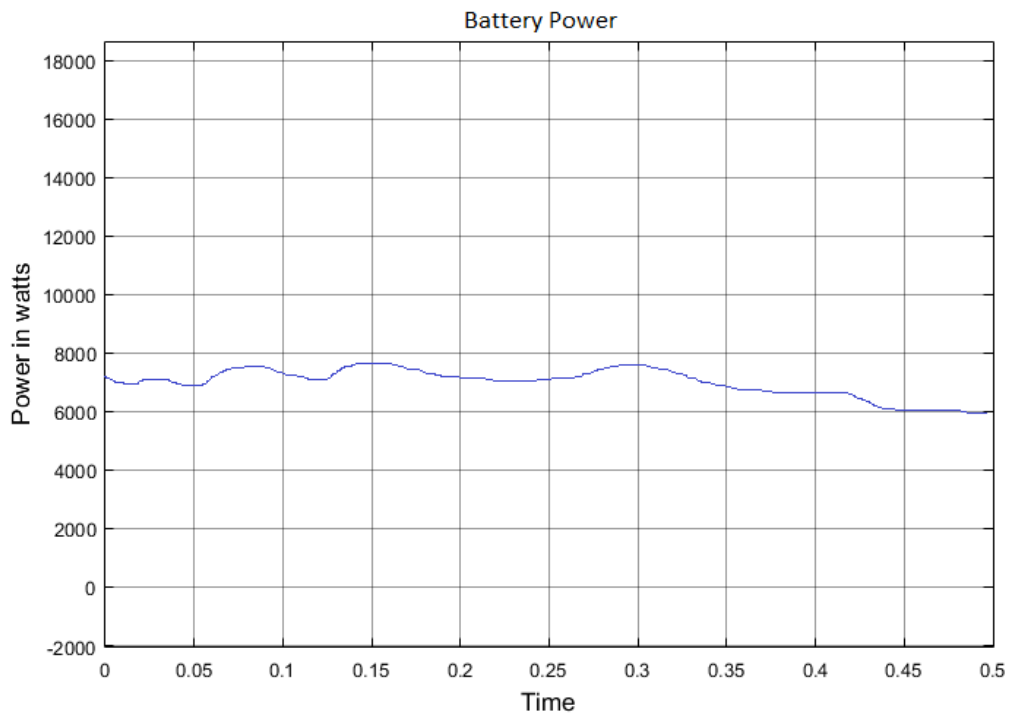


Рисунок 3.18 – Результати моделювання для АКБ (літо)

Потреби в електроенергії для заводу, виходячи з графіку навантажень, дорівнюють 267321 МВт.

Електроенергія, яка вироблена обраними ДЗЕ без урахування потужності мережі, становить 96387 МВт (встановлено в результаті імітаційного моделювання). Таким чином, витрати електроенергії з мережі становитимуть 170934 МВт. Зниження втрат електроенергії відбулося на 96387 МВт, що становить 36,05% від загальних потреб електроенергії для заводу.

Система керування з застосуванням ДЗЕ працює справно. Контролер також працює справно згідно з розробленою математичною моделлю.

Фрагмент лістингу програми для реалізації імітаційної моделі (блок розподілу) наведений у додатку А.

Виконаємо порівняння отриманих результатів з вже відомими у вигляді таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняння отриманих результатів

Параметр	Відомі рішення	Отримане рішення	Різниця, %
Зменшення витрат електроенергії, %	30	36,05	6,05
Зменшення вартості енергозабезпечення, %	30	36,05	6,05
Зменшення обсягів викидів CO ₂ , %	15	18,02	3,02

Таким чином, розроблена система керування джерелами енергозабезпечення підприємства є більш ефективною в порівнянні з існуючими аналогами. Система працює справно, що може казати про

можливість застосування розробленого рішення на практиці для енергозабезпечення підприємств з застосування ВДЕ.

3.3 Висновки до розділу 3

В результаті написання третього розділу виконане дослідження розробленої системи керування розподілом джерел енергозабезпечення підприємства.

Для розглянутого підприємства зниження втрат електроенергії відбулося на 96387 МВт, що становить 36,05% від загальних потреб електроенергії для заводу. Саме тому можна встановити, що зменшення вартості енергозабезпечення також становить 36,05%, що на 6,05% більше від відомих аналогів. Показники роботи автоматичної системи керування перевершили показники існуючих аналогів, що каже за високу технічну та економічну ефективність запропонованого рішення.

ВИСНОВКИ

За результатами написання магістерської дисертації можна сформулювати наступні висновки:

1. Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) - це джерела енергії найближчого майбутнього. Вони характеризуються екологічною чистотою, високою безпекою, постійною доступністю, а їх ресурси в багато разів перевищують доступні для огляду потреби в енергії всього людства. Але, незважаючи на всі позитивні якості ВДЕ, їм притаманні і недоліки, основними з яких є мала щільність, нерівномірність географічного розподілу та нестабільність (добова, сезонна, погодна) енергетичних потоків. Недосконалість технологій також обмежує їх широке поширення, проте вирішення цих проблем можливе. Вже зараз рівень розвитку сучасної науки і техніки дозволяє успішно використовувати ВДЕ для енергопостачання споживачів у низці випадків.

2. Підвищити ефективність систем енергозабезпечення можна завдяки використанню системи керування розподілом джерел енергозабезпечення, яка здатна до оперативного розпізнавання конкретних ситуацій, що виникають у системі, та реакції на них відповідно. Подібного роду системи можуть бути не просто новітніми системами енергозабезпечення, а й частиною розвитку сучасної енергетики – концепції Smart Grids («розумні» мережі).

3. Розроблена структурна і функціональна схеми системи керування розподілом джерел енергозабезпечення. Структурна блок-схема складається з наступних блоків: ФЕУ; ВЕУ; мережа; АКБ; силовий комутатор (СК); узгоджуючі пристрої; баластний пристрій (БП); буфер; інвертор; навантаження змінного струму (споживач); блок контролю і прогнозування. Елементи умовно об'єднані в чотири групи: блоки генерації енергії, перетворювально-розподільні блоки, споживач та система контролю і прогнозування. До блоків генерації належать: ФЕУ, ВЕУ, потужність мережі 10кВ та АКБ. Таким чином, є два некерованих первинних перетворювача

(ФЕУ та ВЕУ); один «квазі-керований» (накопичувач) та одне кероване джерело (АКБ), що забезпечує безперебійне електроживлення споживача.

4. Виконане імітаційне моделювання системи керування. Електроенергія, яка вироблена обраними ДЗЕ без урахування потужності мережі, становить 96387 МВт. Таким чином, витрати електроенергії з мережі становитимуть 170934 МВт. Зниження втрат електроенергії для наведеного прикладу складає 96387 МВт, що становить 36,05% від загальних потреб електроенергії для заводу. Система керування з застосуванням ДЗЕ працює справно. Контролер також працює справно згідно з розробленою математичною моделлю.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Відновлювальні джерела енергії: метод. вказівки до курсу / уклад.: Н.А. Панченко, Т.В. Доник. – К: КПІ ім. І.Сікорського, 2019. – 26 с.
2. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії. – К.: НТУУ «КПІ», 2012.
3. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії / Під заг. ред. А.К. Шидловського. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2007. – 560 с.
4. Башинська Ю.І. Переваги і недоліки використання відновлюваних джерел енергії / Ю.І. Башинська // Сучасні наукові підходи до стабільного економічного розвитку та економічної безпеки: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. - Чернігів, 2014. - С.254.
5. Куликов Ю.А. Накопители электроэнергии — эффективный инструмент управления режимами электроэнергетических систем. Сб. тр. конф. «Электроэнергетика глазами молодежи–2018». Казань, КГЭУ, 2018, с. 38–43.
6. А.А.Александров, М.Н.Захаров, М.С.Куц. Оптимизация энергоснабжения производственного комплекса с использованием возобновляемых источников энергии. ISSN 0236-3941. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2021. № 1. – с.85-102.
7. Елистратов В.В. Оптимальные решения системы автоматического управления энергокомплексов средней мощности на основе возобновляемых источников энергии // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. 2019. Т. 2. Вып. 2. С. 69–85.
8. Elistratov V.V., Diuldin M.V., Denisov R.S. Justification of project and operation modes of hybrid energy complexes for arctic conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 180. 012006. DOI: 10.1088/1755- 1315/180/1/012006.
9. Qazi, S.H.; Mustafa, M.W. Review on active filters and its performance with grid connected fixed and variable speed wind turbine generator. Renew.

Sustain. Energy Rev. 2016, 57, 420–438.

10. Ouadi, H.; Ait Chihab, A.; Giri, F. Adaptive nonlinear control of three-phase shunt active power filters with magnetic saturation. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2015, 69, 104–115.

11. Mohod, S.W.; Aware, M.V. Micro Wind Power Generator with Battery Energy Storage for Critical Load. *IEEE Syst. J.* 2012, 6, 118–125.

12. Ronay, K.; Dumitru, C.D. Management of a Power System Based on Renewable Energy. *Procedia Technol.* 2014, 12, 693–697.

13. Li, J.; Fang, J.; Zeng, Q.; Chen, Z. Optimal operation of the integrated electrical and heating systems to accommodate the intermittent renewable sources. *Appl. Energy* 2016, 167, 244–254.

14. Putrus, G.; Bentley, E. Integration of distributed renewable energy systems into the smart grid. *Electr. Renew. Energy Syst.* 2016, 487–518.

15. Renani, E.T.; Mohamad Elias, M.F.; Rahim, N.A. Using data-driven approach for wind power prediction: A comparative study. *Energy Convers. Manag.* 2016, 118, 193–203.

16. Badea, N.; Barbu, M. Experimental Case Study. In *Design for Micro-Combined Cooling, Heating and Power Systems*; Springer-Verlag: London, UK, 2014; pp. 337–394.

17. Vlad, C.; Barbu, M.; Vilanova, R. Intelligent Control of a Distributed Energy Generation System Based on Renewable Sources. *Sustainability* 2016, 8, 748 p.

18. Electrical Engineering Portal would like to send push notifications of new technical articles and guides [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://electrical-engineering-portal.com/electrical-distribution-systems> (дата звернения: 20.10.2022).

19. Фишов А.Г., Карджаубаев Н.А., Эрдэнэбат Э. Мультиагентное регулирование напряжения в электрических сетях// Релейная защита и автоматика энергосистем 2017: междунар. выст. и конф., Санкт-Петербург, 25–28 апр. 2017 г.: сб. докл. - Санкт-Петербург, 2017.

20. Фишов А.Г., Семендяев Р.Ю., Марченко А.И., Ивкин Е. С., Автоматика опережающего деления в схемах присоединения малой генерации к электрической сети// Релейная защита и автоматика энергосистем 2017: междунар. выст. и конф., Санкт-Петербург, 25–28 апр. 2017 г. : сб. докл. - Санкт-Петербург, 2017.

21. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений: Специальный справочник. – СПб.: ПИТЕР, 2002. – 158 с.

22. Ивашкин Ю.А. Мультиагентное имитационное моделирование больших систем. – М.: МГУПБ, 2015. – 238 с.

23. Лега Ю. Г. Методи імітаційного моделювання систем та процесів: практикум : навч. посіб. / Ю. Г. Лега, А. Д. Кожухівський, О. А. Кожухівська. – Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси: ЧДТУ, 2010. – 247 с.

ДОДАТОК А

Відомість матеріалів кваліфікаційної роботи

№	Формат	Позначення	Найменування	Кількість аркушів	Примітка
1					
2			Документація		
3					
4	A4	ЕЕ.ОППм.22.10.ПЗ	Пояснювальна записка		
5					
6			Графічні матеріали		
7					
8		ЕЕ.ОППм.22.10.ПМ			

ДОДАТОК Б

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

```
%Оптимальний розподіл навантажень%
n=input('Введіть число (число ціле!) джерел
енергозабезпечення n=');
func=input('Введіть потужність кожного ДЗЗ');%вводимо
потужність для кожного агрегату
varb=input('Введіть ККД ланцюга перемикачів');
size_func=size(func);%визначаємо число введених функцій
size_varb=size(varb);%визначаємо число введених змінних
Minx=input('Minx');
Maxx=input('Maxx');
if size_func(1,1)~=n || size_varb(1,1)~=n || length(Maxx)~=3
|| length(Minx)~=3 %перевірка відповідності числа введених
функцій і змінних введеному числу ДЗУ
    error('Помилка! Число введених функцій,змінних або
граничних умов не відповідає заданному числу ДЗЗ.');
```

```
end
grf=input(' y/n :','s');
gr1=[];
nag=S+3;
gr2=[];
del=0;
count=0;
tag=1:n;
answer=zeros(1,n);
sing_ex=0;%масив ознак того, що навантаження не виходить за
верхні обмеження
sing_sh=0;
while not isempty(tag)
    sys1='';
```

```

sys2='';
sum_shortage=0;
sum_excess=0;
for k=tag
    if count==0
        disp(['Похідна від' ' ' deblank(func(k,:)) ' ' '(' 'HX'
' ' int2str(k) ' ' 'ДЗЕ' ')' ':']);
        disp(diff(func(k,:),deblank(varb(k,:))));
    end
    sys2=[sys2 '+' deblank(varb(k,:))];
    sys1=[sys1 ',' [char(diff(func(k,:),deblank(varb(k,:))) '=-
h']]];
end
nom=findstr(sys2,'+');
sys2(nom(1))='';
nom=findstr(sys1,',');
sys1(nom(1))='';
sys2=[sys2 '=' num2str(S)];
decision=solve(sys1,sys2);
if count==0
disp('*****
*****
*****');
    disp('Вирішення задачі оптимального розподілу
навантаження');
disp('*****
*****
*****');
    for j=1:n
        y=eval(char(['decision.' deblank(varb(j,:))]));
        disp([int2str(j) ' ' 'ДЗЕ:' ' ' deblank(varb(j,:)) '='
num2str(double(y))]);

```

```

    end
end
q=1;
q1=1;
q2=1;
for j=tag
%Блок визначення сумарного перевищення навантаження
    excess(j)=eval([char(['decision.'   deblank(varb(j,:))])
    '-' num2str(Maxx(j))]);
    if double(excess(j))>0
        sum_excess=double(sum_excess+excess(j));
        sing_ex(j)=1;
    else
        sing_ex(j)=0;%якщо перевищення немає, то ознака
дорівнює 0
    end
%Блок визначення сумарної недостачі
    shortage(j)=eval([num2str(Minx(j)) '-' char(['decision.'
deblank(varb(j,:))])]);%знаходимо недостачу потужності з
нижніх гранць обмежень та з урахуванням енергії сонця і вітру
    if double(shortage(j))>0%
        sum_shortage=double(sum_shortage+shortage(j));
        sing_sh(j)=1;
    else
        sing_sh(j)=0;
    end
end
for j=tag
    if sing_ex(j)==sing_sh(j)%якщо ознаки співпадають, то
навантаження не виходить за обмеження

```

```

        answer(j)=eval(char(['decision.'
deblank(varb(j,:))]));%для цього ДЗЕ навантаження знайдене
з урахуванням енергії сонця та вітру
        del(q)=j;
        q=q+1;
    end
    if sing_ex(j)>sing_sh(j)
        gr1(q1)=j;
        q1=q1+1;
    end
    if sing_ex(j)<sing_sh(j)
        gr2(q2)=j;
        q2=q2+1;
    end
end
if sum_shortage==sum_excess
    for w=1:length(gr1);
        answer(gr1(w))=Maxx(gr1(w));
    end
    for c=1:length(gr2);
        answer(gr2(c))=Minx(gr2(c));
    end
    fl=0;
end
if sum_excess>sum_shortage
    for w=1:length(gr1);
        answer(gr1(w))=Maxx(gr1(w));
        S=S-Maxx(gr1(w));
    end
    str=[int2str(del) ' ' int2str(gr1)];
    str=str2num(str);
    b=int2str(tag);

```

```

    for j=1:length(str)
        b=strrep(b,int2str(str(j)),' ');
    end
    tag=str2num(b)
    if length(gr2)==1
        answer(gr2(1))=S;
        tag=[];
    end
end
if sum_excess<sum_shortage
    for w=1:length(gr2);
        answer(gr2(w))=Minx(gr2(w));
        S=S-Minx(gr2(w));
    end
    str=[int2str(del) ' ' int2str(gr2)];
    str=str2num(str);
    b=int2str(tag);
    for j=1:length(str)
        b=strrep(b,int2str(str(j)),' ');
    end
    tag=str2num(b)
    if length(gr1)==1
        answer(gr1(1))=S;
        tag=[];
    end
end
count=1;
end
disp('*****');
disp('*****');
disp('*****');
disp('*****');

```

```

for j=1:length(answer)
    disp(['Оптимальне навантаження для' ' ' int2str(j) ' '
'DЗЕ:' ' ' deblank(varb(j,:)) '=' num2str(answer(j))]);
end
if grf=='y'
for j=1:n
    y=inline (diff(func(j,:),deblank(varb(j,:))));
    mn(j)=y(nag);
    mx(j)=y(1);
end
ymin=min(mn);
ymax=max(mx);
clc;
for i=1:n
    p=1;
    for j=ymin:dy:ymax

f=double(solve([char(diff(func(i,:),deblank(varb(i,:))) '='
num2str(j))]);
        subplot(2,n+1,i+n+1), plot(f,j);grid on;
        title([' ' int2str(i)]);

eval(['t',int2str(i),'(',int2str(p),')',' ','=' ,num2str(f)]);
        hold on;
        p=p+1;
    end
    subplot(2,n+1,i), ezplot(func(i,:),[0 nag]);grid on;hold
on
    title(['H' int2str(i)]);
end
subplot(2,n+1,2*n+2), plot(t1+t2+t3,ymin:dy:ymax);
grid on

```

end