

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації енергосистем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Денис ДЕРЕВ'ЯНКО

«8» червня 2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Управління, захист та
автоматизація енергосистем»**

**спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

**на тему: «Дослідження участі гравітаційного накопичувача енергії у
балансуванні активної потужності»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ЕК-21

Яковенко Андрій Володимирович

Керівник:

Асистент,

Гулий Володимир Сергійович

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра автоматизації енергосистем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Управління, захист та автоматизація енергосистем»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Денис ДЕРЕВ'ЯНКО

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Яковенко Андрію Володимировичу

1. Тема проєкту «Дослідження участі гравітаційного накопичувача енергії у балансуванні активної потужності», керівник проєкту Гулий Володимир Сергійович, затверджені наказом по університету від «25» травня 2026 р. № 1885-с

2. Термін подання студентом проєкту «8» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту Дослідження участі гравітаційного накопичувача енергії у балансуванні активної потужності

4. Зміст пояснювальної записки:

Опис головної схеми електричних з'єднань підстанції 110/35/10 кв «Учбова».

Математична модель енергосистеми з гравітаційним накопичувачем енергії.

Дослідження роботи енергосистеми з гравітаційним накопичувачем енергії.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо):

Схема п/ст 110/35/10 кВ «Учбова»

Розрахунок струмів короткого замикання та формули математичної моделі ГНЕ

Імітаційна модель енергосистеми з гравітаційним накопичувачем енергії

Результати моделювання енергосистеми з гравітаційним накопичувачем енергії

6. Дата видачі завдання «01» грудня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз та опис схеми п/ст 110/35/10 кВ «Учбова»	15.12.2025	
2	Розрахунок струмів короткого замикання	15.01.2026	
3	Підбір та аналіз літератури щодо енергосистем з ГНЕ та з високою частотою ВДЕ	28.02.2026	
4	Складання математичної моделі енергосистеми з ГНЕ	01.04.2026	
5	Створення моделі енергосистеми з ГНЕ в Matlab SIMULINK	01.05.2026	
6	Аналіз роботи моделі енергосистеми в паралельному та ізольованому режимі роботи	15.05.2026	
7	Оформлення пояснювальної записки	31.05.2026	

Студент

Андрій ЯКОВЕНКО

Керівник

Володимир ГУЛИЙ

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/П	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	141.EK2110.010.ДБ	Завдання на дипломний проект	1	
2	A4	141.EK2110.010.ДБ	Пояснювальна записка	74	
3	A1	141.EK2110.010.ТК1	Схема п/ст 110/35/10 кВ «Учбова»	1	
4	A1	141.EK2110.010.ТК2	Розрахунок струмів короткого замикання та формули математичної моделі ГНЕ	1	
5	A1	141.EK2110.010.ТК3	Імітаційна модель енергосистеми з гравітаційним накопичувачем енергії	1	
6	A1	141.EK2110.010.ТК4	Результати моделювання енергосистеми з гравітаційним накопичувачем енергії	1	

					141.EK2110.010.ДБ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Відомість дипломного проекту		
Розроб.	Яковенко А.В.						
Перевір.	Гулий В.С.						
Реценз.							
Н. Контр.	Ягельський Є.О.						
Затверд.	Дерев'янко Д.Г.				Літ. Арк. Аркушів		
					4 78		
					КПІ «ім. Ігоря Сікорського» група ЕК-21		

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Дослідження участі гравітаційного накопичувача енергії у
балансуванні активної потужності»**

Київ – 2026 року

РЕФЕРАТ

Даний дипломний проєкт виконаний на 74 аркушах, містить 30 рисунків, 8 таблиць, 4 листи графічної частини, 21 джерело посилання і 2 додатки.

Об'єкт дослідження – процеси зміни активної потужності у мікромережі із встановленим гравітаційним накопичувачем енергії та значною часткою відновлювальних джерел енергії.

Предмет дослідження – модель та алгоритми керування твердотілого гравітаційного накопичувача енергії у складі мікромережі із сонячною електростанцією.

Мета дослідження – Розробка моделі гравітаційного накопичувача енергії у складі мікромережі та алгоритму керування для забезпечення стабільного функціонування її в ізолюваному та паралельному режимах роботи.

Результати роботи – розроблено математичну модель мікромережі з ГНЕ та високою часткою ВДЕ та алгоритм керування. Аналіз отриманих результатів дослідження показав, що застосування алгоритму керування накопичувачем дозволяє автоматично компенсувати дефіцит потужності у мікромережі та знизити пікове навантаження на лінію зв'язку з об'єднаною енергосистемою у 3,5 рази у паралельному режимі роботи. В ізолюваному режимі використання ГНЕ забезпечує автономну роботу мікромережі протягом 22,4 год із підтриманням режимних параметрів у межах допустимих значень за умови 100 % заряду ГНЕ на початку моделювання.

Ключові слова: ГРАВІТАЦІЙНИЙ НАКОПИЧУВАЧ ЕНЕРГІЇ, МІКРОМЕРЕЖА, СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, БАЛАНСУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ.

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ABSTRACT

This diploma project is made on 74 sheets, contains 30 figures, 8 tables, 4 sheets of the graphic part, 21 reference sources and 2 appendices.

Objects of research – the processes of active power variation in a microgrid equipped with a gravity energy storage system (GESS) and a high share of renewable energy sources (RES).

Subject of research – the model and control algorithms of a solid-mass gravity energy storage system operating within a microgrid alongside a solar power plant.

Purpose of the research – the development of a GESS model within a microgrid and a control algorithm to ensure its stable operation in both islanded and grid-connected modes.

Results of a work – a mathematical model of a microgrid with a GESS and a high share of RES, as well as a control algorithm, have been developed. The analysis of the research results demonstrated that applying the storage control algorithm allows for automatic compensation of power deficits in the microgrid and reduces the peak load on the tie-line with the main power grid by a factor of 3.5 during grid-connected operation. In islanded mode, the use of GESS ensures the autonomous operation of the microgrid for 22.4 hours, maintaining operational parameters within permissible limits, provided a 100% initial GESS state of charge at the start of the simulation.

Keywords: GRAVITY ENERGY STORAGE, MICROGRID, SOLAR POWER PLANT, POWER BALANCING, SIMULATION MODELING, CONTROL SYSTEM.

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП.....	12
1 ОПИС ГОЛОВНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ ПІДСТАНЦІЇ 110/35/10 КВ «УЧБОВА».....	13
1.1 Опис п/ст	13
1.2 Опис обладнання	15
1.2.1 Силові трансформатори	15
1.2.2 Трансформатори напруги	16
1.2.3 Трансформатори струму (ТС)	18
1.2.4 Обладнання захисту	19
1.2.5 Роз'єднувачі	20
1.2.6 Вимикачі	21
1.2.7 Струмопроводи та кабельні лінії	23
1.3 Розрахунок струмів короткого замикання.....	25
1.4 Перевірка встановленого обладнання	30
Висновки	31
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОСИСТЕМИ З ГРАВІТАЦІЙНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ	33
2.1 Сучасний стан впровадження накопичувачів електроенергії.....	33
2.1.1 Проблема балансування.....	33
2.1.2 Класифікація систем накопичення енергії (СНЕ).....	35
2.1.3 Класифікація та принципи роботи ГНЕ.....	38
2.2 Математичний опис моделі баштової системи ГНЕ.....	40
2.3 Рівняння механічної підсистеми.....	44
2.4 Рівняння електричної підсистеми.....	45
2.5 Розрахунок режимів роботи ГНЕ.....	46
2.6 Математична модель взаємодії гравітаційного накопичувача енергії з мікромережею	51
2.6.1 Режим роботи ГНЕ в мікромережі	52

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

2.6.2 Динаміка накопиченої енергії (рівень заряду)	52
2.6.3 Взаємозв'язок електричних та механічних параметрів системи акумуляції	53
Висновки	54
3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЕНЕРГОСИСТЕМИ З ГРАВІТАЦІЙНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ	56
3.1 Опис імітаційної моделі мікромережі	56
3.1.1 Сонячна електростанція (СЕС)	56
3.1.2 Мережевий інвертор (VSC) та DC-ланка	57
3.1.3 Локальне навантаження	58
3.1.4 Трансформаторне обладнання	58
3.1.5 Блок зовнішньої енергосистеми (ОЕС)	58
3.1.6 Система керування мікромережі (EMS)	59
3.1.7 Гравітаційний накопичувач енергії (ГНЕ)	59
3.2 Моделювання роботи мікромережі в ізолюваному режимі	61
3.2.1 Аналіз балансу активної потужності мікромережі	62
3.2.2 Аналіз електрофізичних параметрів та якості електроенергії мікромережі	64
3.2.3 Аналіз кінематичних параметрів накопичувача	67
3.3 Моделювання роботи мікромережі в паралельному режимі	68
Висновки	72
ВИСНОВКИ	74
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	75
ДОДАТОК А	77
ДОДАТОК Б	78

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АВР	—	автоматичне ввімкнення резерву
АСНЕ	—	акумуляторна система накопичення енергії
ВДЕ	—	відновлювальні джерела енергії
ВН	—	висока напруга
ГАЕС	—	гідроакумулявальна електростанція
ГНЕ	—	гравітаційні накопичувачі енергії
ГСПЗС	—	гнучкі системи передачі змінного струму
ДГУ	—	дизель-генераторна установка
ЕЕС	—	електроенергетична система
КЗ	—	коротке замикання
ККД	—	коефіцієнт корисної дії
НН	—	низька напруга
ОЕС	—	об'єднана енергетична система
РЗА	—	релейний захист та автоматика
РП	—	розподільчий пункт
СЕС	—	сонячна електростанція
СГПМ	—	синхронний генератор на постійних магнітах
СМПР	—	система моніторингу перехідних режимів
СН	—	середня напруга
СНЕ	—	система накопичення енергії
ТН	—	трансформатор напруги
ТП	—	трансформаторна підстанція

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

TC	–	трансформатор струму
AC	–	(англ. Alternating Current) змінний струм
BESS	–	(англ. Battery Energy Storage System) акумуляторна система накопичення енергії
CAES	–	(англ. Compressed Air Energy Storage) система накопичення енергії на стисненому повітрі
DC	–	(англ. Direct Current) постійний струм
EMS	–	(англ. Energy Management System) система керування енергією
FACTS	–	(англ. Flexible AC Transmission System) гнучкі системи передачі змінного струму
GES	–	(англ. Gravity Energy System) гравітаційний накопичувач енергії
LCOE	–	(англ. Levelised Cost of Energy) зведена вартість електроенергії
MPPT	–	(англ. Maximum Power Point Tracking) відстеження точки максимальної потужності
RTE	–	(англ. Round-Trip Efficiency) ефективність повного циклу
SGES	–	(англ. Solid Gravity Energy System) твердотільний гравітаційний накопичувач енергії
SMES	–	(англ. Superconducting Magnetic Energy Storage) надпровідний магнітний накопичувач енергії
SoC	–	(англ. State of Charge) рівень заряду
VSC	–	(англ. Voltage Source Converter) інвертор напруги

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

ВСТУП

Сучасний розвиток електроенергетики характеризується зростанням частки відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних електростанцій (СЕС). Їх використання сприяє зменшенню споживання викопного палива та зниженню впливу енергетики на довкілля. Водночас виробіток електроенергії СЕС залежить від погодних умов, що ускладнює підтримання балансу потужності в енергетичній мережі. У зв'язку з цим виникає потреба у застосуванні систем накопичення енергії (СНЕ), здатних компенсувати коливання генерації та забезпечувати стабільність режимів роботи.

Зростання частки генерації з ВДЕ обумовлює необхідність впровадження накопичувачів енергії, які можуть швидко реагувати на зміну балансу потужності та підвищувати ефективність використання генерованої електроенергії. Одним із перспективних рішень є гравітаційні накопичувачі енергії (ГНЕ) твердотільного типу, перевагами яких є тривалий строк служби, відсутність електрохімічної деградації та відносно низький вплив на довкілля.

У локальних мікромережах із високою часткою сонячної генерації надійність електропостачання значною мірою залежить від узгодженої роботи джерел генерації, накопичувачів енергії та навантаження. Під час інтеграції таких систем до існуючої електроенергетичної інфраструктури, зокрема розподільчих підстанцій 110/35/10 кВ, важливим завданням є розроблення систем керування, здатних забезпечувати необхідні параметри режиму як при роботі з об'єднаною енергосистемою, так і в автономному режимі.

Для дослідження роботи ГНЕ необхідно враховувати взаємодію його механічної та електричної підсистем під час перехідних процесів. Тому актуальним є створення математичної та імітаційної моделі мікромережі, що дозволяє аналізувати режими її роботи, оцінювати енергетичний баланс та досліджувати вплив накопичувача на характеристики системи. Реалізація такої моделі в середовищі Simulink дає можливість дослідити процеси накопичення та віддачі енергії, а також оцінити ефективність застосованих алгоритмів керування.

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

1 ОПИС ГОЛОВНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ ПІДСТАНЦІЇ 110/35/10 КВ «УЧБОВА»

1.1 Опис п/ст

Проектована підстанція напругою 110/35/10 кВ є понижувальною підстанцією відгалужувального типу з двостороннім живленням. Вона призначена для прийому електроенергії від енергосистеми на напрузі 110 кВ, її трансформації та подальшого розподілу споживачам на напругах 35 кВ та 10 кВ.

На підстанції встановлено два силові трансформатори (ТДТНГ-40500/110), що забезпечує надійність електропостачання споживачів. У нормальному режимі обидва трансформатори знаходяться в роботі, працюючи роздільно на стороні високої, середньої та низької напруги.

Схема з'єднань на стороні 110 кВ виконана за спрощеною схемою: «Два блоки лінія – трансформатор з відокремлювачами та неавтоматичним роз'єднувачем з боку ліній».

Особливістю даної схеми є відсутність високовольтних вимикачів у колах силових трансформаторів. Замість них застосовано комбінацію швидкодіючих короткозамикачів та автоматичних відокремлювачів.

У випадку пошкодження всередині силового трансформатора релейний захист дає команду на включення короткозамикача, створюючи штучне однофазне коротке замикання. Це фіксується захистом зі сторони живлення, що призводить до відключення відповідної лінії електропередачі. У момент зникнення струму пристрої РЗА відділяють пошкоджений трансформатор за допомогою відокремлювача.

Для проведення ремонтних робіт та оперативних перемикачів передбачено роз'єднувачі, які створюють видимий розрив кола.

					141.ЕК2110.010.ДБ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Яковенко А.В.			Дослідження участі гравітаційного накопичувача енергії у балансуванні активної потужності			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Гулий В.С.								13	78
Реценз.								КПІ «ім. Ігоря Сікорського» група ЕК-21			
Н. Контр.		Ягельський Є.О.									
Затверд.		Дерев'янко Д.Г.									

Для підвищення надійності та гнучкості керування схемою передбачена перемичка між лініями живлення, з встановленими роз'єднувачами.

Зв'язок між розподільчими пристроями різних класів напруги здійснюється за допомогою двох триобмоткових силових трансформаторів (ТДТНГ-40500/110). Регулювання рівня напруги здійснюється пристроєм РПН на стороні високої напруги, що дозволяє підтримувати рівень напруги у допустимих межах на шинах споживачів у межах допустимих значень при зміні навантажень.

Розподільчий пристрій 35 кВ виконано за схемою «Одинарна система шин, секціонована вимикачем». Шини 35 кВ розділені на дві секції. Кожна секція живиться від одного силового трансформатора. Між секціями встановлено секційний вимикач, який призначений для секціонування і в нормальному режимі розімкнений.

У разі аварійного відключення одного з джерел живлення, передбачено роботу пристрою автоматичного ввімкнення резерву (АВР), який вмикає секційний вимикач, відновлюючи живлення споживачів знеструмленої секції від робочого трансформатора. Відхідні лінії підключаються через вимикачі та роз'єднувачі.

Розподільчий пристрій 10 кВ виконано за схемою «Одинарна секціонована система шин». Обладнання 10 кВ розміщується у закритому приміщенні, що захищає його від впливу навколишнього середовища.

З метою забезпечення безперебійного живлення відповідальних споживачів на секціях шин 10 кВ передбачено пристрій автоматичного включення резерву (АВР), що діє на включення секційного вимикача.

Від шин 10 кВ живляться розподільчі лінії до ТП та РП споживачів, а також трансформатори власних потреб підстанції.

Надійність функціонування підстанції забезпечується системою власних потреб, яка отримує живлення від шин 10 кВ. Вона живить приводи вимикачів, освітлення, обігрів шаф обладнання та пристрої релейного захисту й автоматики.

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

1.2 Опис обладнання

1.2.1 Силові трансформатори

Силовий трансформатор є головним і найважливішим елементом будь-якої трансформаторної підстанції, оскільки саме він виконує ключову функцію перетворення електричної енергії з одного класу напруги в інший для її подальшого розподілу. На представленій схемі (рис. А.1) підстанції встановлено два основних головних силових трансформатори (Т-1 та Т-2) типу ТДТНГ-40500/110 (рис. 1.1).

Таблиця 1.1 – Параметри ТДТНГ-40500/110

Параметр	Значення
Номінальна потужність	40500 кВА
Розрахункова $U_{ВН}$	112 кВ
Розрахункова $U_{СН}$	38,5 кВ
Розрахункова $U_{НН}$	11 кВ

Трансформатори типу ТДТНГ є трифазними трьохобмотковими трансформаторами з оливним охолодженням та примусовим дуттям, які обладнані системою РПН і мають грозотривке виконання ізоляції.

Обмотки ВН трансформатора з'єднані в зірку з виведеною нейтраллю, обмотки СН – також у зірку, а обмотки НН – у трикутник.



Рисунок 1.1 – Трансформатор ТДТНГ-40500/110

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Окрім основних силових трансформаторів, загальна схема підстанції передбачає наявність трансформатора власних потреб, який живить внутрішнє обладнання самої підстанції. На стороні розподільчого пристрою 10 кВ підключений силовий трансформатор типу ТМ-150/10 (Рис. 1.2).

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики ТМ-150/10

Параметр	Значення
Тип трансформатора	ТМ (Трифазний оливний)
Номінальна потужність	150 кВА
Первинна напруга	10 кВ
Вторинна напруга	0,4 / 0,23 кВ



Рисунок 1.2 – Трансформатор ТМ-150/10

1.2.2 Трансформатор напруги

Трансформатори напруги (ТН) є спеціалізованими вимірювальними пристроями, головне призначення яких полягає у перетворенні високої первинної напруги до уніфікованих значень для роботи вимірювальних приладів, пристроїв комерційного обліку електроенергії та мікропроцесорних або електромеханічних кіл релейного захисту і автоматики. Загальна схема підстанції передбачає встановлення таких трансформаторів на всіх розподільчих пристроях для безперервного моніторингу параметрів мережі. На стороні середньої напруги

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

35 кВ до кожної секції збірних шин підключені вимірювальні комплекси, до складу яких входять трансформатори напруги типу ЗНОМ-35-65 (Рис. 1.3).

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики ЗНОМ-35-65

Параметр	Значення
$U_{\text{ном}}$ первинної обмотки	$\frac{35000}{\sqrt{3}}$ В
$U_{\text{ном}}$ основної вторинної обмотки	$\frac{100}{\sqrt{3}}$ В
$U_{\text{ном}}$ додаткової вторинної обмотки	$\frac{100}{3}$ В
$P_{\text{ном}}$ (клас точності 0,5)	150 ВА

Однофазний оливний заземлений ТН призначений для напруги класу 35 кВ. Вони виконують функцію шинних ТН, забезпечуючи постійний контроль рівня напруги на обох секціях розподільчого пристрою у складі вимірювального комплексу.



Рисунок 1.3 – Трансформатор напруги ЗНОМ-35-65

На стороні напруги класу 10 кВ виконано систему безперервного вимірювання напруги на збірних шинах. Для цього використовуються однофазні оливні ТН типу НОМ-10 параметри яких наведені у таблиці 1.4. Вони мають номінал 10000/110 В і підключаються безпосередньо до алюмінієвих шин через відповідні роз'єднувачі та запобіжники.

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики НОМ-10

Параметр	Значення
$U_{\text{НОМ}}$ первинної обмотки	10000 В
$U_{\text{НОМ}}$ вторинної обмотки	100 В
$P_{\text{НОМ}}$ (класи точності 0,5/1,0/3,0)	75 / 150 / 300 ВА
$P_{\text{макс}}$	630 ВА

1.2.3 Трансформатори струму

Трансформатори струму (ТС) використовуються для перетворення великих первинних струмів до нормованих значень для живлення струмових кіл вимірювальних приладів та пристроїв захисту.

На стороні напруги класу 110 кВ встановлені трансформатори струму типу ТВТ-110/200-600 (вбудований ТС). ТС даного типу конструктивно розміщуються безпосередньо всередині високовольтних вводів силового трансформатора, що дозволяє суттєво зекономити простір на відкритому розподільчому пристрої та зменшити загальну вартість обладнання.

На стороні 35 кВ трансформатори струму встановлені як на відхідних лініях, так і в колі заземлення нейтралі. У нейтралі використовуються апарати типу ТК-20/0.66 з коефіцієнтом трансформації 100/5. Даний котушковий ТС фіксує струми нульової послідовності при замиканнях фази на землю.

На розподільчому пристрої 10 кВ встановлено трансформатори струму багатьох типів, вибір яких для конкретного приєднання залежить від наступних факторів: величини максимального робочого струму, вимог до класу точності вторинних обмоток, струмів короткого замикання, а також конструктивного виконання комірки РП. На вводах великої потужності від силових трансформаторів (Рис. А.1) встановлені вимірювальні ТС типу ТШЛ-10/2000 та ТПШЛ-10/2000 (трансформатор шинний литий). Лита епоксидна ізоляція забезпечує високу надійність та стійкість до механічних навантажень при

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

протіканні великих струмів.

На відхідних кабельних лініях 10 кВ встановлені ТС типу ТПФМ-10 (трансформатор прохідний фарфоровий модернізований), ТПОЛ-10 (трансформатор прохідний одноститковий литий) та ТПФ-10. Вони мають різні коефіцієнти трансформації, такі як 100/5, 300/5 або 400/5, залежно від розрахункового навантаження конкретної лінії, що живить до споживача.

1.2.4 Обладнання захисту

Система захисту підстанції є комплексним набором обладнання, призначеним для запобігання пошкодженню обладнання від руйнівного впливу атмосферних перенапруг, внутрішніх комутаційних перенапруг та надструмів короткого замикання. Для захисту від перенапруг на всіх класах напруги широко застосовуються вентильні розрядники. На вводах 110 кВ встановлені розрядники типу РВС-110 (Рис. 1.4). Аналогічні станційні вентильні розрядники РВС-35 змонтовані на шинах та виводах 35 кВ. В колі нейтралі 110 кВ застосована комбінована збірка РВС-15+РВС-35 для захисту ізоляції нульової точки трансформатора в режимі розімкненої нейтралі. На розподільчому пристрої 10 кВ встановлені сучасні нелінійні обмежувачі перенапруг типу ОПН-10.



Рисунок 1.4 – Розрядник РВС-110

Важливим елементом захисту мереж 35 кВ є дугогасні котушки, оскільки режим роботи мереж цього класу напруг – це режим з компенсованою нейтраллю. Для компенсації ємнісних струмів при частих однофазних замиканнях на землю встановлені заземлюючі реактори однофазні оливні типу

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

ЗРОМ-550/35 та ЗРОМ-275/35, які з'єднані в паралельні групи для можливості ступінчастого регулювання індуктивного струму.

Комплексом захисного обладнання на стороні 110 кВ є встановлення короткозамикачів та відділювачів, яке замінює собою дорогі високовольтні вимикачі. У разі внутрішнього пошкодження трансформатора РЗА подає сигнал на короткозамикач типу КЗ-110М ФА (Рис. 1.5), який штучно замикає фазний провідник на землю. Після відключення лінії живлення захистом та появи безструмової паузи, відділювач типу ОД-110М ШПО (відділювач з шафовим приводом) автоматично розмикає коло, ізолюючи пошкоджений трансформатор від мережі.

На стороні 10 кВ для захисту обладнання від струмів короткого замикання між двома секціями шин встановлено струмообмежувальний бетонний реактор типу РБ-10/1000. Встановлення реактора збільшує загальний індуктивний опір кола, що знижує величину ударного струму короткого замикання.

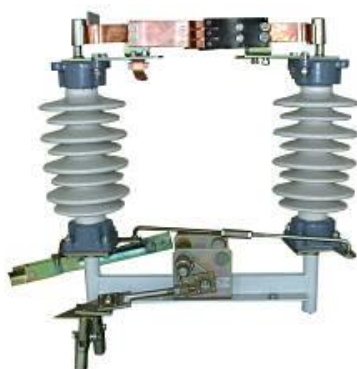


Рисунок 1.5 – Короткозамикач КЗ-110М з фазним приводом

1.2.5 Роз'єднувачі

Роз'єднувачі – це високовольтні комутаційні апарати, які призначені для створення видимого ізоляційного проміжку в електричному колі. Їхньою головною особливістю є відсутність дугогасної камери, тому операції вмикання та вимикання роз'єднувачами дозволяється проводити лише на знеструмлених ділянках кола або при дуже малих струмах відповідно до вимог [1], з метою уникнення появи електричної дуги.

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

На стороні 110 кВ застосовуються роз'єднувачі, які встановлюються ззовні. Приєднання ліній обладнані апаратами типу РЛНД-II-110/600 (Рис. 1.7), (роз'єднувач лінійний зовнішньої установки двоколонковий з двома заземлюючими ножами), що встановлюються для безпечного заземлення відключеної повітряної лінії. Перед відділювачами встановлені роз'єднувачі типу РЛНД-I-110/600 з одним заземлюючим ножем, а в колі заземлення обмоток ВН силових трансформаторів використовуються роз'єднувачі РН-110.



Рисунок 1.7 – Роз'єднувач РЛНД-II-110/600

На розподільчому пристрої 35 кВ встановлені головні шинні роз'єднувачі типу РЛНД-35/1000, через які протікає сумарний струм секції. Відхідні лінії комутуються роз'єднувачами типу РЛНЗ-35/600.

У закритому розподільчому пристрої 10 кВ застосовуються апарати внутрішньої установки серій РВ, РЗВ, РЛВ, РЗК та РВК. Кожна відхідна лінія обов'язково укомплектована двома такими апаратами: шинним роз'єднувачем, який відокремлює комірку від збірних шин підстанції, та лінійним роз'єднувачем, який створює розрив зі сторони кабельної магістралі, забезпечуючи безпеку ремонтного персоналу, наприклад, при обслуговуванні оливного вимикача, розташованого між ними.

1.2.6 Вимикачі

Високовольтні вимикачі є основними комутаційними апаратами, які здатні вмикати та вимикати електричні кола не лише в нормальних робочих режимах

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

під навантаженням, але й автоматично розривати струми короткого замикання завдяки наявності систем гасіння електричної дуги.

На схемі (Рис. А.1) даної підстанції відсутні вимикачі на стороні напруги класу 110 кВ, оскільки завдяки здешевленню конструкції їхню роль виконує комбінація автоматичних короткозамикачів та відділювачів, про які згадувалося раніше.

На стороні 35 кВ для захисту та комутації приєднань встановлені оливні камерні вимикачі типу МКП-35/1000 (Рис. 1.8). У даному типі вимикачів використовується великий об'єм трансформаторної оливи як для гасіння дуги, так і для ізоляції струмовідних частин від заземленого корпусу.

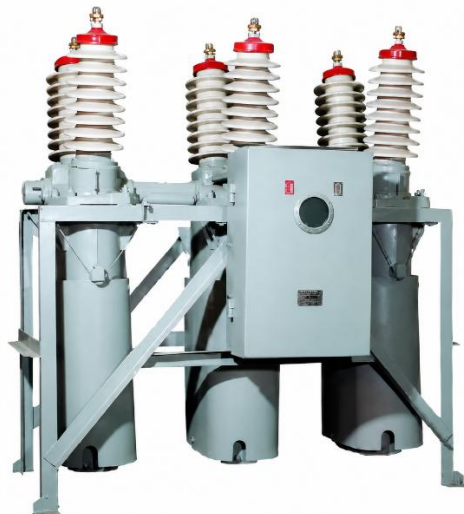


Рисунок 1.8 – Вимикач МКП-35/1000

Розподільчий пристрій 10 кВ оснащений значною кількістю вимикачів, типи яких відрізняються залежно від приєднання. Ввідні комірки від головних силових трансформаторів обладнані апаратами серій ВГГ-10/2000 (Рис. 1.9 а) та МГГ-10/2000 (Рис. 1.9 б) (вимикач горшковий генераторний та оливний горшковий генераторний вимикач відповідно). Вони розраховані на тривале протікання номінальних струмів до 2000 А. Секційний вимикач між двома системами шин типу ВМГ-133-П-10/1000 (Рис. 1.9 в) (вимикач малооливний горшковий). На відміну від бакових вимикачів, малооливні апарати використовують оливу виключно для гасіння електричної дуги в дугогасній

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

камері, а не для загальної ізоляції, що робить їх набагато компактнішими, легшими та пожежобезпечнішими. Саме тому для захисту всіх відхідних кабельних ліній 10 кВ, які живлять споживачів, досить часто застосовуються малооливні вимикачі таких типів як ВМГ-133-ІІ-10/500 та ВМГ-10/630. Кожен вимикач керується власним електромагнітним або пружинним приводом, який забезпечує необхідну швидкість переміщення рухомих контактів під час виконання команд від оператора або пристроїв релейного захисту.

Таблиця 1.5 — Основні технічні характеристики вимикачів 10 кВ

Тип вимикача	Номинальна напруга, кВ	Номинальний струм, А	Номинальний струм відключення, кА
ВГГ-10/2000	10	2000	45
МГГ-10/2000	10	2000	45
ВМГ-133-ІІ-10/1000	10	1000	20
ВМГ-133-ІІ-10/600	10	600	20
ВМГ-10/630	10	630	20



а)



б)



в)

Рисунок 1.9 – Вимикачі а) ВГГ-10/2000 б) МГГ-10/2000 в) ВМГ-133-ІІ-10/1000

1.2.7 Струмопроводи та кабельні лінії

Струмопровідні елементи та кабельні магістралі забезпечують надійну передачу електричної енергії між різними класами напруги та її подальший розподіл до кінцевих споживачів. Залежно від місця встановлення, умов

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

експлуатації та величини робочих струмів, на підстанції застосовуються різні типи провідників. На відкритих розподільчих пристроях високої та середньої напруги використовують неізольовані сталеві алюмінієві проводи. Живлення підстанції на стороні 110 кВ від повітряних ліній «N1» та «N2» здійснюється проводом марки АСО-300 (алюмінієво-сталекий полегшений провід з перерізом 300 мм²). З'єднання на стороні 110 кВ також виконані провідником даного типу. На розподільчому пристрої 35 кВ відхідні повітряні лінії змонтовані з використанням проводу марки АСО-400. Збільшення перерізу до 400 мм² зумовлене величиною струму: при передачі сталої потужності на напрузі меншого класу викликає відповідне зростання робочих струмів. Для формування збірних шин на порталах 35 кВ застосовані проводи марки АС-400 та АС-150.

На закритому розподільчому пристрої 10 кВ для збірних шин та внутрішньокміркової ошиновки використовуються провідники прямокутного перерізу типів А-80х6, А-80х10 або А-50х10. Шини даних марок здатні витримувати значні електродинамічні зусилля, які виникають під час протікання ударних струмів короткого замикання, зберігаючи при цьому свою форму та безпечні ізоляційні відстані всередині металевих шаф.

Розподіл електроенергії від секцій 10 кВ до трансформаторних підстанцій та розподільчих пунктів споживачів здійснюється за допомогою підземних кабельних магістралей. На схемі (Рис. А.1) застосовуються трижильні силові кабелі з паперовою просоченою ізоляцією марок ААБ (алюмінієва жила, алюмінієва оболонка, сталеві броня) та АСБ (алюмінієва жила, свинцева оболонка, сталеві броня). Кабелі АСБ використовують у ґрунтах з високою корозійною активністю або при наявності блукаючих струмів. Мінімальна площа поперечного перерізу жил цих кабелів визначається для кожної лінії на основі теплових розрахунків та очікуваних струмів навантаження. На підстанції (Рис. А.1) фідери приєднань 10 кВ виконано кабелями з площею поперечного перерізу: 3х50, 3х70, 3х185 та 3х240 мм².

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

1.3 Розрахунок струмів короткого замикання

З метою перевірки обраного комутаційного обладнання електродинамічну й термічну стійкість проведемо розрахунок струмів короткого замикання (КЗ). Результати розрахунку дозволять перевірити здатність апаратів витримувати аварійні режими без пошкоджень.

Розрахункова схема об'єкта на якій приведені точки КЗ зображена на рис. 1.6.

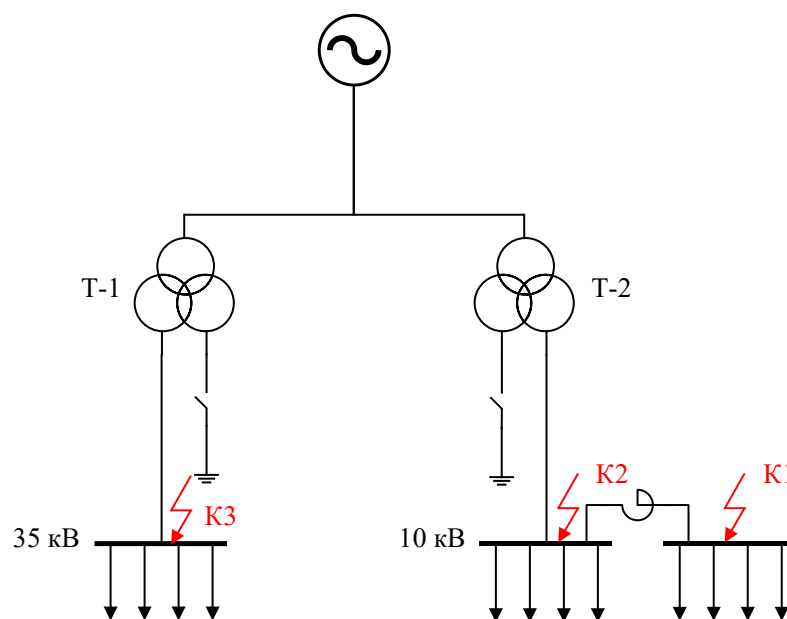


Рисунок 1.6 – Розрахункова схема підстанції з точками КЗ

Параметри трансформатора ТДТНГ 40500/110:

$$S_{\text{ном}} = 40.5 \text{ (МВА)}$$

$$U_{\text{ВН}} = 112 \text{ (кВ)}$$

$$U_{\text{СН}} = 38.5 \text{ (кВ)}$$

$$U_{\text{НН}} = 11 \text{ (кВ)}$$

$$u_{\text{к\%В-Н}} = 18.5\%$$

$$u_{\text{к\%В-С}} = 10.9\%$$

$$u_{\text{к\%С-Н}} = 7\%$$

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

ЛЕП:

$$l = 40 \text{ (км)}$$

$$x_0 = 0.429 \left(\frac{\text{Ом}}{\text{км}} \right)$$

$$r_0 = 0.0958 \left(\frac{\text{Ом}}{\text{км}} \right)$$

Характеристика системи:

$$S_c = \infty \text{ (МВА)}$$

$$U_c = \text{const}$$

$$E_c = 1 \text{ (в. о.)}$$

$$x_c = 0 \text{ (в. о.)}$$

$$r_c = 0 \text{ (в. о.)}$$

Базисні параметри:

$$f = 50 \text{ (Гц)}$$

$$\omega = 2\pi f = 314.16$$

$$S_{\text{баз}} = 100 \text{ (МВА)}$$

$$U_{\text{базВН}} = 115 \text{ (кВ)}$$

$$U_{\text{базСН}} = 38.5 \text{ (кВ)}$$

$$U_{\text{базНН}} = 10.5 \text{ (кВ)}$$

$$I_{\text{баз1}} = \frac{S_{\text{баз}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{базВН}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0.502 \text{ (кА)}$$

$$I_{\text{баз2}} = \frac{S_{\text{баз}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{базСН}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 38.5} = 1.50 \text{ (кА)}$$

$$I_{\text{баз3}} = \frac{S_{\text{баз}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{базНН}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 5.50 \text{ (кА)}$$

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

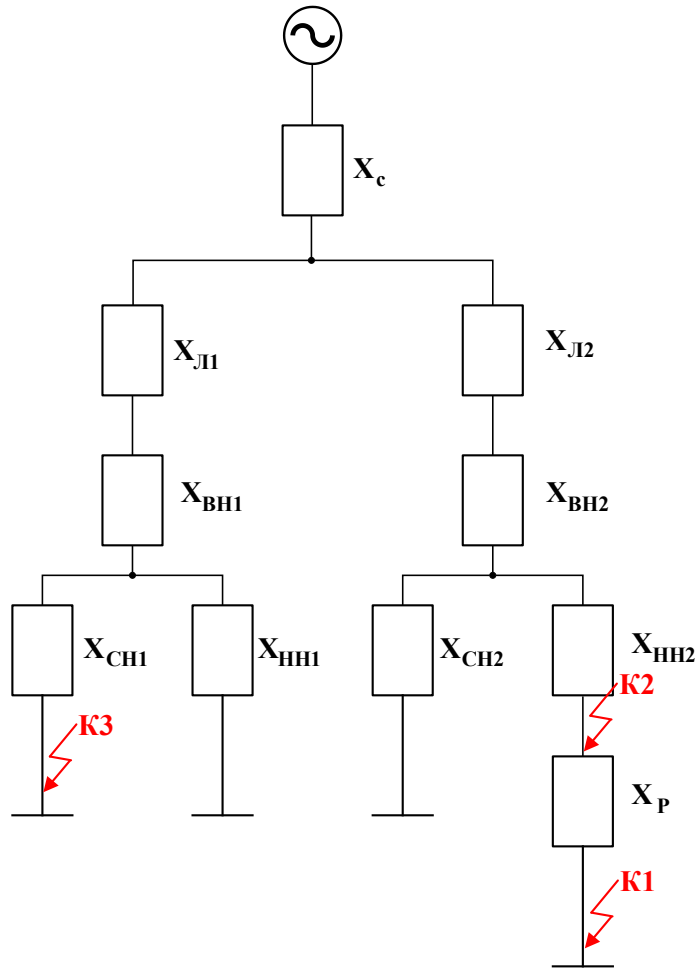


Рисунок 1.7 – Схема заміщення підстанції «Учбова»

Реактивний опір лінії:

$$x_{\text{л}} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\text{баз}}}{U_{\text{баз1}}^2} = 0.429 \cdot 40 \cdot \frac{100}{115^2} = 17.16 \cdot 0.00756 = 0.13 \text{ (в.о.)}$$

Активний опір лінії:

$$r_{\text{л}} = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\text{баз}}}{U_{\text{баз1}}^2} = 0.0958 \cdot 40 \cdot \frac{100}{115^2} = 3.832 \cdot 0.00756 = 0.029 \text{ (в.о.)}$$

Напруга обмоток короткого замикання:

$$u_{\text{k}\%(B)} = 0.5 \cdot (u_{\text{k}\%(B-H)} + u_{\text{k}\%(B-C)} - u_{\text{k}\%(C-H)}) = 0.5 \cdot (18.5 + 10.9 - 7.0) = \\ = 0.5 \cdot 22.4 = 11.2\%$$

$$u_{\text{k}\%(C)} = 0.5 \cdot (u_{\text{k}\%(B-C)} + u_{\text{k}\%(C-H)} - u_{\text{k}\%(B-H)}) = 0.5 \cdot (10.9 + 7.0 - 18.5) = \\ = 0.5 \cdot (-0.6) = -0.3\%$$

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

$$u_{k\%(H)} = 0.5 \cdot (u_{k\%(B-H)} + u_{k\%(C-H)} - u_{k\%(B-C)}) = 0.5 \cdot (18.5 + 7.0 - 10.9) = \\ = 0.5 \cdot 14.6 = 7.3\%$$

Реактивний опір трансформаторів (ТДТНГ-40500/110):

$$x_{T(B)} = \frac{u_{k\%(B)}}{100} \cdot \frac{S_{\text{баз}}}{S_{\text{ном}}} = \frac{11.2}{100} \cdot \frac{100}{40.5} = 0.112 \cdot 2.469 = 0.276 \text{ (в.о.)}$$

$$x_{T(C)} = \frac{u_{k\%(C)}}{100} \cdot \frac{S_{\text{баз}}}{S_{\text{ном}}} = \frac{-0.3}{100} \cdot \frac{100}{40.5} = -0.003 \cdot 2.469 = -0.007 \text{ (в.о.)}$$

$$x_{T(H)} = \frac{u_{k\%(H)}}{100} \cdot \frac{S_{\text{баз}}}{S_{\text{ном}}} = \frac{7.3}{100} \cdot \frac{100}{40.5} = 0.073 \cdot 2.469 = 0.180 \text{ (в.о.)}$$

Активний опір трансформаторів:

$$R_T = \frac{\Delta P_{\text{кз}} \cdot 10^{-3}}{S_{\text{ном}}} \cdot \frac{S_{\text{баз}}}{S_{\text{ном}}} = \frac{200 \cdot 10^{-3}}{40.5} \cdot \frac{100}{40.5} = 0.012 \text{ (в.о.)}$$

Реактивний та активний опори ЛЕП (АСО-300, l = 40 км):

$$x_L = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\text{баз}}}{U_{\text{баз1}}^2} = 0.429 \cdot 40 \cdot \frac{100}{115^2} = 0.130 \text{ (в.о.)}$$

$$r_L = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\text{баз}}}{U_{\text{баз1}}^2} = 0.0958 \cdot 40 \cdot \frac{100}{115^2} = 0.029 \text{ (в.о.)}$$

Визначення параметрів струмообмежувального реактора

Для точки К₁ встановлено реактор на відхідній лінії 10 кВ. Для реактора типу РБ-10-630-0.14 параметри якого наведені у табл. 1.6 розрахуємо його реактивний опір x_p .

Таблиця 1.6 – Параметри реактору РБ-10-630-0.14

Параметр	Значення
$U_{\text{ном}}$	10 кВ
$I_{\text{ном}}$	630 А
$x_{p\%}$	14%

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Реактивний опір реактора:

$$x_p = \frac{x_{p\%}}{100} \cdot \frac{S_{\text{баз}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot I_{\text{НОМ}}} = \frac{14}{100} \cdot \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0.63} = 1.28 \text{ (в.о.)}$$

Активний опір реактора мізерно малий, тому:

$$r_p = 0 \text{ (в.о.)}$$

Результуючі опори протікання струму для точок короткого замикання:

Для точки K₁ (відхідна лінія 10 кВ за реактором):

$$x_{\text{резK1}} = x_{\text{резK2}} + x_p = 0.626 + 1.28 = 1.906 \text{ (в.о.)}$$

$$r_{\text{резK1}} = r_{\text{резK2}} + r_p = 0.041 + 0 = 0.041 \text{ (в.о.)}$$

Для точки K₂ (шини 10 кВ):

$$x_{\text{резK2}} = x_c + x_l + x_{T(B)} + x_{T(H)} = 0.04 + 0.130 + 0.276 + 0.180 = 0.626 \text{ (в.о.)}$$

Для точки K₃ (шини 35 кВ):

$$x_{\text{резK3}} = x_c + x_l + x_{T(B)} + x_{T(C)} = 0.04 + 0.130 + 0.276 - 0.007 = 0.439 \text{ (в.о.)}$$

$$r_{\text{резK3}} = r_c + r_l + R_T = 0 + 0.029 + 0.012 = 0.041 \text{ (в.о.)}$$

$$r_{\text{резK2}} = r_c + r_l + R_T = 0 + 0.029 + 0.012 = 0.041 \text{ (в.о.)}$$

Значення постійної часу загасання:

$$T_{aK1} = \frac{x_{\text{резK1}}}{\omega \cdot r_{\text{резK1}}} = \frac{1.906}{314.16 \cdot 0.041} = 0.148 \text{ (с)}$$

$$T_{aK2} = \frac{x_{\text{резK2}}}{\omega \cdot r_{\text{резK2}}} = \frac{0.626}{314.16 \cdot 0.041} = 0.0486 \text{ (с)}$$

$$T_{aK3} = \frac{x_{\text{резK3}}}{\omega \cdot r_{\text{резK3}}} = \frac{0.439}{314.16 \cdot 0.041} = 0.034 \text{ (с)}$$

Значення ударного коефіцієнту:

Час $t = 0.01$ с відповідає настанню ударного струму.

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$k_{yK1} = 1 + e^{\frac{-0.01}{T_{aK1}}} = 1 + e^{\frac{-0.01}{0.148}} = 1.934$$

$$k_{yK2} = 1 + e^{\frac{-0.01}{T_{aK2}}} = 1 + e^{\frac{-0.01}{0.0486}} = 1.814$$

$$k_{yK3} = 1 + e^{\frac{-0.01}{T_{aK3}}} = 1 + e^{\frac{-0.01}{0.034}} = 1.745$$

Періодична складова ударного струму короткого замикання:

Точка К₃ знаходиться на ступені 38.5 кВ (I_{баз2}):

$$I_{п.К3} = \frac{E_c}{x_{резК3}} \cdot I_{баз2} = \frac{1}{0.439} \cdot 1.50 = 3.417 \text{ (кА)}$$

Точки К₂ та К₁ знаходяться на ступені 10.5 кВ (I_{баз3}):

$$I_{п.К2} = \frac{E_c}{x_{резК2}} \cdot I_{баз3} = \frac{1}{0.626} \cdot 5.50 = 8.786 \text{ (кА)}$$

$$I_{п.К1} = \frac{E_c}{x_{резК1}} \cdot I_{баз3} = \frac{1}{1.906} \cdot 5.50 = 2.885 \text{ (кА)}$$

Миттєве значення ударного струму короткого замикання:

$$i_{yK3} = \sqrt{2} \cdot I_{п.К3} \cdot k_{yK3} = \sqrt{2} \cdot 3.417 \cdot 1.745 = 8.43 \text{ (кА)}$$

$$i_{yK2} = \sqrt{2} \cdot I_{п.К2} \cdot k_{yK2} = \sqrt{2} \cdot 8.786 \cdot 1.814 = 22.53 \text{ (кА)}$$

$$i_{yK1} = \sqrt{2} \cdot I_{п.К1} \cdot k_{yK1} = \sqrt{2} \cdot 2.885 \cdot 1.934 = 7.89 \text{ (кА)}$$

1.4 Перевірка встановленого обладнання

Відповідно до розрахунків струмів КЗ у трьох обраних точках підстанції, найбільше значення періодичної складової та миттєве значення ударного струму виникає в точці короткого замикання К₂ і становить 8.79 кА та 22.53 кА відповідно.

На підстанції встановлені вимикачі різних типів, каталожні характеристики яких (табл. 1.5) повністю задовольняють умови роботи при аварійних режимах:

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найменш потужні з них – малооливні вимикачі відхідних ліній 10 кВ (типи ВМГ-133 та ВМГ-10) мають номінальний струм відключення 20 кА та граничний струм електродинамічної стійкості 52 кА.

Вимикачі на вводах 10 кВ від трансформаторів (типи ВГГ-10, МГГ-10) розраховані на струм відключення до 45 кА та ударний струм до 115 кА.

На стороні 35 кВ вимикачі МКП-35 мають номінальний струм відключення 25 кА та витримують ударний струм до 64 кА.

Отримані результати розрахунку струмів короткого замикання не перевищують максимально допустимих значень електродинамічної та комутаційної стійкості вимикачів відповідних типів, параметри деяких наведені у табл. 1.5. Це підтверджує здатність даних вимикачів здійснювати успішну комутацію струмів пошкодження в усіх розрахункових аварійних режимах. Крім того, встановлені роз'єднувачі перевірені за умовами роботи в аварійних режимах. Хоча роз'єднувачі не призначені для відключення струмів КЗ, у замкненому стані вони повинні надійно пропускати наскрізні струми пошкодження без руйнування. Тому обрані апарати перевірено на електродинамічну стійкість та на термічну стійкість.

Висновки

У першому розділі було виконано детальний розгляд головної схеми електричних з'єднань підстанції 110/35/10 кВ "Учбова". Проаналізовано її призначення, як понижувальної підстанції відгалужувального типу з двостороннім живленням, та особливості виконання розподільчих пристроїв на всіх класах напруги. Розглянуто специфіку застосування комбінації короткозамикачів і відділювачів на стороні 110 кВ замість традиційних високовольтних вимикачів, а також принципи секціонування та роботи автоматичного ввімкнення резерву (АВР) на сторонах 35 кВ і 10 кВ.

Здійснено поглиблений аналіз встановленого силового обладнання, включаючи трансформатори ТДТНГ-40500/110, вимірювальні трансформатори

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

струму і напруги, захисні апарати та різноманітні комутаційні пристрої. Описано їхні конструктивні особливості, маркування та пояснено їхню роль у забезпеченні надійності та безпеки функціонування підстанції.

Ключовим етапом стало проведення розрахунку струмів короткого замикання для трьох характерних точок схеми. На основі отриманих результатів виконано перевірку комутаційного обладнання на електродинамічну. Проведений аналіз результатів розрахунку показав, що розглянуті вимикачі задовольняють вимогам щодо електродинамічної та термічної стійкості, а їхня комутаційна здатність гарантує надійну роботу в усіх розрахункових аварійних режимах.

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОСИСТЕМИ З ГРАВІТАЦІЙНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

2.1 Сучасний стан впровадження накопичувачів електроенергії

2.1.1 Проблема балансування

Глобальний перехід до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), докорінно змінює принципи функціонування традиційних енергосистем [2]. Основною проблемою інтеграції цих джерел є часте порушення балансу між споживанням та генерацією електроенергії, спричинене стохастичним характером їх генерації: мінливістю швидкості вітру та інтенсивності сонячного випромінювання [3].

Критичним аспектом є зниження інерції енергосистеми. Традиційні синхронні генератори забезпечують фізичну інерцію, яка протидіє миттєвим змінам частоти. ВДЕ, що підключаються до мережі через інвертори, не мають такої механічної інерції, що робить систему вразливою до швидких відхилень частоти та напруги у разі аварійних збурень [8].

Поряд із нестабільністю генерації ВДЕ, значним викликом залишається добова нерівномірність самого споживання електроенергії, яка характеризується наявністю суттєво виражених ранкових та вечірніх піків. В умовах зниження системної інерції класичний підхід «генерація підлаштовується під споживання» стає технічно складним. Це вимагає переходу до нових підходів, зокрема до концепції активного споживача та впровадження механізмів керованого навантаження.

Для вирішення проблеми балансування потужності та вирівнювання графіку навантаження необхідно застосовувати комплексний підхід, що базується на технологіях Smart Grid [3]. Ключовими елементами такої системи є:

					141.ЕК2110.010.ДБ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Яковенко А.В.			Дослідження участі гравітаційного накопичувача енергії у балансуванні активної потужності	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Гулий В.С.					33	78
Реценз.						КПІ «ім. Ігоря Сікорського» група ЕК-21		
Н. Контр.		Ягельський Є.О.						
Затверд.		Дерев'янко Д.Г.						

Гнучкі системи передачі змінного струму (ГСПЗС, FACTS): Ці пристрої дозволяють динамічно керувати потоками активної та реактивної потужності. Взаємозв'язок між рівнем напруги та перевантаженнями полягає у тому, що при зниженні напруги в мережі струм, необхідний для передачі споживачам заданої величини активної потужності, пропорційно зростає. Це призводить до струмових перевантажень ліній і трансформаторів та збільшення технологічних втрат електроенергії на нагрівання провідників. Застосування ГСПЗС дозволяє локально компенсувати реактивну потужність, стабілізуючи рівень напруги та знижуючи струмові навантаження, а також примусово перерозподіляти перетоки активної потужності паралельними гілками мережі для уникнення локальних перевантажень.

Акумуляторна система накопичення енергії (АСНЕ): Акумуляторні батареї відіграють важливу роль у регулюванні частоти. Вони здатні швидко накопичувати енергію та віддавати її в мережу, згладжуючи короткострокові коливання потужності генерації [3].

ШІ-прогнозування: Використання алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування генерації ВДЕ та навантаження в реальному часі дозволяє оптимізувати диспетчеризацію та завчасно реагувати на можливі дисбаланси [9, 10].

Аналіз ефективності впровадження цих технологій демонструє значне покращення показників якості електроенергії. Зокрема, при частці ВДЕ на рівні 50% у нерегульованих системах спостерігаються небезпечні коливання напруги понад $\pm 5\%$. Впровадження інтелектуального управління дозволяє знизити цей показник до $\pm 1,8\%$ навіть при зростанні частки ВДЕ до 70% [2].

Крім того, застосування активних систем балансування суттєво впливає на динамічну стійкість мережі. Час відновлення частоти до номінального рівня після значних аварійних збурень може бути скорочено з 9 секунд (у традиційних мережах) до 4 секунд при використанні систем накопичення енергії для швидкого реагування [2]. Також використання систем моніторингу перехідних режимів

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(СМПР) забезпечує диспетчерські центри високоточними синхронізованими даними про стан енергосистеми в реальному часі. На основі цих даних автоматизовані алгоритми керування здатні динамічно оптимізувати перетоки потужності, що дозволяє знизити перевантаження ліній електропередач.

Протягом останнього десятиліття в Об'єднаній енергетичній системі (ОЕС) України відбулася докорінна зміна структури генерації через стрімке впровадження ВДЕ. Станом на кінець 2021 року загальна встановлена потужність об'єктів ВДЕ (включно із сонячними станціями домогосподарств) перевищила 9,5 ГВт, а їхня частка у загальному енергобалансі країни сягнула близько 14% [11, 13]. Незважаючи на тимчасову втрату частини потужностей (особливо вітрової генерації) внаслідок повномасштабного вторгнення, розвиток сектору триває: лише протягом 2023 року в Україні було побудовано близько 350 МВт нових об'єктів ВДЕ [12, 13]. Більше того, в умовах постійних загроз для централізованої енергетичної інфраструктури, розосереджена сонячна та вітрова генерація набула стратегічного значення для забезпечення функціонування енергосистеми [13].

Отже, забезпечення надійного балансування енергосистеми з такою високою часткою ВДЕ вимагає переходу від традиційних методів управління до адаптивних, з використанням засобів прогнозування, накопичення енергії та гнучкого керування мережею.

2.1.2 Класифікація систем накопичення енергії (СНЕ)

Системи накопичення енергії можна класифікувати за формою збереженої енергії на кілька основних категорій [4]:

Механічні: зберігають енергію у вигляді потенціальної або кінетичної енергії. До цієї групи належать гідроакumuлювальні електростанції (ГАЕС), маховики, системи накопичення на стисненому повітрі (CAES), а також твердотільні гравітаційні накопичувачі (SGES) [14].

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Електрохімічні: використовують зворотні хімічні реакції для накопичення та віддачі електричного струму. Найпоширенішими представниками є літій-іонні, свинцево-кислотні та проточні акумуляторні батареї (BESS) [15].

Електромагнітні: накопичують енергію безпосередньо в електричному або магнітному полі без проміжних механічних чи хімічних перетворень, що забезпечує миттєву швидкість реакції. До цієї групи відносять суперконденсатори (збереження заряду в електричному полі) та надпровідні індуктивні накопичувачі SMES (акумуляування в магнітному полі котушки) [16].

Теплові: акумуляують надлишкову енергію у вигляді тепла для її подальшого перетворення в електроенергію. Типовими прикладами є системи на розплавлених солях та матеріали з фазовим переходом [17].

Хімічні: передбачають перетворення електроенергії на хімічний енергоносіє для тривалого (сезонного) зберігання, наприклад, виробництво водню або синтетичного метану шляхом електролізу (технологія Power-to-Gas) [18].

Серед них для задач стабілізації енергомережі та інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) ключову роль відіграють механічні та електрохімічні системи, кожна з яких має свої техніко-економічні особливості.

Гідроакумуляуючі електростанції (ГАЕС). Історично найбільш поширеною технологією є гідроакумуляуючі системи, які відносяться до механічного типу накопичення [5]. Принцип їх роботи базується на переміщенні води між двома резервуарами, розташованими на різній висоті, використовуючи надлишкову електроенергію для закачування води (заряд) та вивільняючи її через турбіни для генерації (розряд).

ГАЕС характеризуються високою номінальною потужністю, тривалим терміном експлуатації (40–60 років і більше) [4] та відносно низькими експлуатаційними витратами. Вони здатні забезпечувати значну інерцію системи та приймати участь у регулюванні частоти.

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Головним обмеженням є жорстка залежність від геологічних та топографічних умов (необхідність значного перепаду висот) [5]. Крім того, будівництво ГАЕС супроводжується значними капітальними витратами, тривалим часом зведення та суттєвим впливом на екосистему через затоплення територій [19].

Електрохімічні накопичувачі. Електрохімічні системи, зокрема літій-іонні батареї, демонструють високу ефективність (85–95%) [15] та швидку реакцію на зміни навантаження, що робить їх ефективним інструментом для короткострокового регулювання частоти та активної потужності в енергосистемі.

Попри високу питому енергоємність, широке застосування Li-ion батарей у потужних енергосистемах стримується низкою факторів. По-перше, це незворотна деградація ємності, яка зумовлена двома паралельними процесами: обмеженою кількістю циклів заряду-розряду (циклічне старіння) та хімічною деградацією акумуляторів з плином часу, незалежно від їхньої експлуатації (календарне старіння). По-друге, існують екологічні ризики, пов'язані з видобутком рідкісних металів (літій, кобальт), складнощами утилізації токсичних електролітів, а також висока пожежонебезпека через ризик критичного перегріву, що переходить у тепловий розгін акумуляторних комірок [4].

Гравітаційні накопичувачі енергії (ГНЕ, англ. Gravity Energy Storage — GES). Гравітаційні системи розглядаються як перспективна альтернатива традиційним системам накопичення, що займає нішу між ГАЕС та акумуляторними батареями. Принцип їх дії аналогічний ГАЕС, але замість води використовується потенційна енергія твердих мас (бетонні блоки, пісок, важкі вантажі), що піднімаються та опускаються [5].

ГНЕ поєднують довговічність механічних систем із гнучкістю розміщення. Вони не потребують води або специфічного ландшафту, можуть бути встановлені у старих шахтах, на рівнинах або у висотних вежах [5]. На відміну від електрохімічних батарей, гравітаційні системи не мають ефекту саморозряду, не

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деградують з часом та використовують доступні, екологічно безпечні матеріали.

Хоча початкові інвестиції можуть бути порівнянними з ГАЕС, нормована вартість електроенергії (англ. Levelised Cost of Energy (LCOE)) для гравітаційних систем є конкурентоздатною у довгостроковій перспективі завдяки низьким витратам на обслуговування та відсутності необхідності заміни компонентів кожні 10–15 років, як це необхідно для Li-ion батарей [4].

Таким чином, гравітаційні накопичувачі розглядаються як технологія, що здатна компенсувати недоліки традиційних рішень, забезпечуючи екологічне та довговічне зберігання енергії без географічних обмежень ГАЕС та проблем деградації хімічних акумуляторів.

2.1.3 Класифікація та принципи роботи ГНЕ

На основі аналізу сучасних технологічних рішень, системи ГНЕ можна класифікувати за способом розміщення та механізмом перетворення енергії на три основні групи: твердотільні (наземні блочні системи), шахтні (підвісні системи) та поршневі (гідравлічні гравітаційні системи) [6, 7].

Твердотільні блочні системи (Tower/Crane-based Systems). Цей тип ГНЕ базується на використанні підйомних кранів або спеціальних веж для вертикального переміщення твердих вантажів. Прикладом реалізації цієї технології є система компанії Energy Vault зображена на рис. 2.1 [6]. Принцип роботи базується на використанні спеціалізованого багатопроменевого крана, який переміщує композитні блоки вагою близько 35 тонн. Процес зарядження системи (акумуляування енергії) відбувається у періоди надлишку потужності в енергосистемі: електродвигуни крана піднімають блоки з нижніх рівнів та поетапно укладають їх один на один, формуючи щільну багатоярусну вежу. Таким чином електрична енергія перетворюється на запас потенційної енергії маси. У режимі розрядження (при дефіциті потужності) блоки по черзі опускаються на нижні рівні під дією сили тяжіння, при цьому підйомні механізми працюють у генераторному режимі, віддаючи електроенергію назад у мережу.

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38



Рис. 2.1 – T-GESS

Ключові характеристики: Використання недорогих матеріалів для блоків, таких як будівельне сміття, ґрунт, бетон, тощо. Модульність конструкції, що дозволяє масштабувати запас енергії від 20 до 80 МВт·год. Заявлена ефективність кругового циклу (round-trip efficiency) становить близько 80–90% [6, 7].

Шахтні та свердловинні системи (Gravitricity/Shaft-based). Ця технологія передбачає використання вертикальних стволів (часто – покинутих вугільних або рудних шахт) для підвішування важких вантажів. Провідним розробником у цьому напрямі є компанія Gravitricity [7]. Проект майбутньої системи зображений на рис. 2.2. Система працює за принципом лебідки: важкий вантаж від 500 до 5000 тонн піднімається у вертикальній шахті за допомогою електричних лебідок для накопичення енергії та опускається для її віддачі.



Рисунок 2.2 – Система ГНЕ у підземній шахті (згенеровано ШІ)

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Серед ключових характеристик даного типу систем ГНЕ слід виділити:

- Висока швидкість реакції: система здатна вийти на повну потужність менш ніж за 1 секунду, що робить її ефективною для регулювання частоти в енергосистемі [6].
- Тривалий термін експлуатації без циклічного старіння, яке притаманне хімічним акумуляторам.
- Ефективність системи може досягати 80–90% завдяки використанню сучасних електроприводів та відсутності значних механічних втрат [7].

Поршневі гідравлічні системи (Piston-based/Hydraulic GES). Технологія, відома також як "Gravity Power" або концепція Heindl Energy, поєднує принципи гідроенергетики та механічного накопичення [6, 7]. Конструкція передбачає наявність великого поршня, зазвичай вирізаного з цільної скельної породи або виготовленого з бетону, розміщеного у заповненій водою шахті.

Принцип роботи полягає у тому, що під час надлишку генерації вода під тиском закачується під поршень, піднімаючи його вгору та створюючи запас потенційної енергії, а під час дефіциту електроенергії поршень під власною вагою опускається вниз, витісняючи воду через гідротурбіну, яка генерує електроенергію.

Особливістю цього типу є використання води як робочого тіла для передачі тиску, але накопичення енергії відбувається саме за рахунок маси твердого поршня. Герметизація зазору між поршнем і стінками шахти є однією з основних проблем експлуатації, що забезпечується спеціальними ущільнювачами. Ця технологія дозволяє створювати накопичувачі з великим запасом енергії (МВт·год), займаючи при цьому мінімальну площу на поверхні [6].

2.2 Математичний опис моделі баштової системи ГНЕ

Математична модель системи ГНЕ каркасного типу описує процес перетворення потенційної енергії вантажу в електричну, враховуючи особливості роботи синхронного генератора та динаміку руху.

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нехай система характеризується наступним набором параметрів:

M – маса вантажу, кг.

g – прискорення вільного падіння, м/с².

H – висота зберігання енергії, м.

$P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність генератора, Вт.

T – загальний час циклу генерації, с.

Базовим рівнянням для розрахунку теоретично доступної енергії є формула гравітаційної потенційної енергії, яку система запасає при підйомі вантажу:

$$W_g = M \cdot g \cdot H \quad (2.1)$$

Електрична енергія, що виробляється системою під час опускання вантажу, визначається як інтеграл миттєвої потужності генератора за час спуску:

$$W_p = \int_0^T P(t) dt \approx P_{\text{сер}} \cdot T \quad (2.2)$$

де: $P(t)$ – миттєва потужність генератора в момент часу t

$P_{\text{сер}}$ – середня потужність за цикл.

В якості електромеханічного перетворювача розглядається синхронний генератор на постійних магнітах (СГПМ) типу JFZ268. Профіль генеруючої потужності всієї системи протягом одного робочого циклу (розрядження) має яскраво виражену трапецеподібну форму (Рис. 2.3). Така характеристика зумовлена кінематикою переміщення вантажу і математично описується кусково-лінійною функцією, що залежить від фаз руху приводу: розгону, рівномірного опускання (стабільної генерації) та гальмування:

$$P(t) = \begin{cases} k_1 \cdot t, & 0 \leq t \leq t_1 \\ P_{\text{макс}}, & t_1 \leq t \leq t_2 \\ P_{\text{макс}} - k_2 \cdot (t - t_2), & t_2 \leq t \leq T \end{cases}$$

де: $P_{\text{макс}} \approx 2000$ Вт – пікова потужність,

k_1, k_2 — коефіцієнти швидкості зміни потужності.

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41



Рисунок 2.3 – Крива ефективності генератора

Процес опускання вантажу (розрядки) розділено на чотири етапи, що визначають динаміку системи:

Етап 1. Прискорення: Рівноприскорений рух вниз із прискоренням $a \approx g$ до досягнення швидкості $v_{\text{контр}} = 2.1$ м/с.

$$v(t) = a \cdot t$$

Етап 2. Стабілізація: Рух із постійною швидкістю $v \geq 2.1$ м/с до висоти $h = 0.5$ м над землею.

Етап 3. Попереднє гальмування: Зниження швидкості до контрольного значення 2.1 м/с.

Етап 4. Зупинка: Остаточне гальмування до повної зупинки $v=0$ м/с.

Ключовими показниками системи є ефективність циклу розряджання та загальний ККД повного циклу. Ефективність перетворення енергії під час розряджання визначається як відношення виробленої електричної енергії до витраченої потенціальної енергії вантажу. Проте для повної техніко-економічної оцінки ГНЕ використовують коефіцієнт корисної дії повного циклу (англ. Round-Trip Efficiency), який враховує повну послідовність перетворень енергії і

визначається відношенням виданої в мережу у мережу електроенергії до загального обсягу спожитої під час заряджання.

$$\eta = \frac{W_p}{W_g} \cdot 100\% = \frac{\int_0^T P(t) dt}{M \cdot g \cdot H} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

Функція ефективності $\eta(M)$ є нелінійною. Якщо маса M є недостатньою: Вантаж не здатний подолати сумарний опір системи, який складається з механічних сил тертя $F_{\text{тер}}$, інерції спокою та електромагнітного гальмівного моменту генератора, що виникає при підключенні електричного навантаження. У результаті генерація не відбувається, що призводить до падіння величини η до 0. Якщо маса M є надмірною: Оскільки $P(t)$ обмежена номінальною потужністю генератора $P_{\text{ном}}$, збільшення маси M призводить до зростання W_g , тоді як W_p залишається незмінною обмеженою електричними параметрами генератора. Це призводить до падіння ефективності. Ці залежності зображені графічно на рис. 2.4. Таким чином, цільова функція оптимізації маси вантажу виглядає так:

$$M_{\text{опт}} = \arg \max(M) \left(\frac{P_{\text{ном}} \cdot T(M)}{M \cdot g \cdot H} \right)$$

за умови, що $M \cdot g > F_{\text{тер}}$.

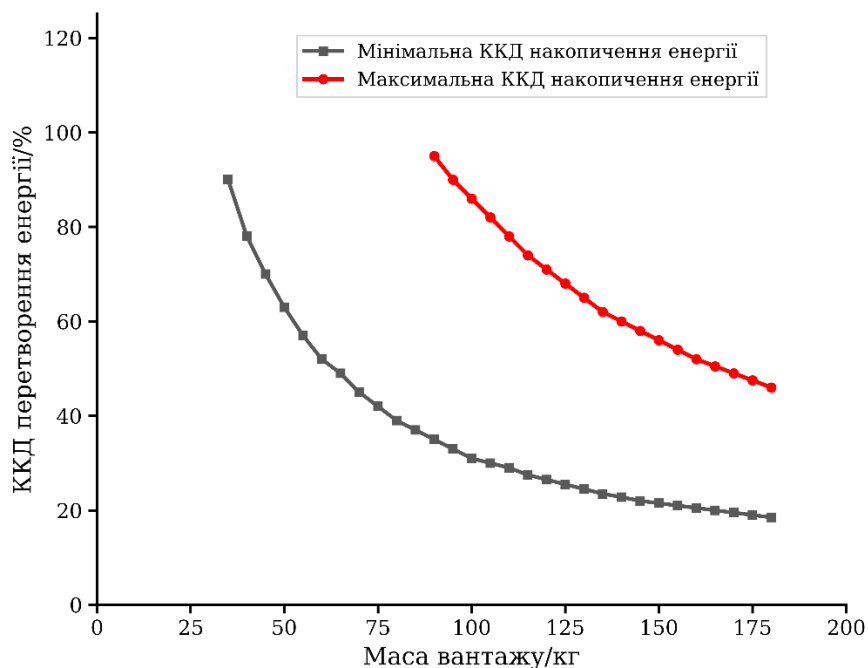


Рисунок 2.4 – Залежність ефективності ГНЕ від маси вантажу

Ця математична модель дозволяє розрахувати оптимальні масо-габаритні параметри вантажу для досягнення максимального ККД системи, що робить її універсальним інструментом для проектування гравітаційних накопичувачів у складі сучасних енергосистем.

2.3 Рівняння механічної підсистеми

Рух твердої маси (вантаж) описується другим законом Ньютона для поступального руху:

$$M \cdot \frac{dv}{dt} = M \cdot g - F_{\text{нат}} - F_{\text{тер}} \quad (2.4)$$

де: M – маса вантажу, кг;

v – лінійна швидкість руху вантажу, м/с;

g – прискорення вільного падіння (9.81 м/с²);

$F_{\text{нат}}$ – сила натягу троса, Н;

$F_{\text{тер}}$ – сила аеродинамічного та механічного опору напрямних, Н.

Сила натягу троса передається на барабан лебідки, створюючи механічний обертальний момент:

$$T_{\text{бар}} = F_{\text{нат}} \cdot R_{\text{бар}} \quad (2.5)$$

де: $R_{\text{бар}}$ – радіус барабана лебідки, м.

Оскільки швидкість обертання барабана зазвичай є недостатньою для прямого приводу генератора, використовується редуктор із коефіцієнтом передачі i . Тоді рівняння обертового руху на валу генератора набуває вигляду:

$$T_{\text{мех}} - T_{\text{ем}} - T_{\text{втр}} = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega_{\text{ген}}}{dt} \quad (2.6)$$

де: $T_{\text{мех}} = \frac{T_{\text{бар}}}{i \cdot \eta_{\text{пер}}}$ – приведений механічний момент на валу генератора, Н·м;

$T_{\text{ем}}$ – електромагнітний момент, що створюється генератором (гальмівний момент), Н·м;

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$T_{\text{втр}}$ – момент втрат на тертя у підшипниках та вентиляцію, Н·м;

J_{Σ} – сумарний момент інерції системи (ротора генератора, редуктора та приведеної маси вантажу), кг·м²;

$\omega_{\text{ген}}$ – кутова швидкість ротора генератора, рад/с.

Зв'язок між лінійною швидкістю вантажу (м/с) та кутовою швидкістю генератора (рад/с) описується формулою:

$$v = \frac{\omega_{\text{ген}} \cdot R_{\text{бар}}}{i} \quad (2.7)$$

2.4 Рівняння електричної підсистеми

В якості електричної машини у сучасних ГНЕ найчастіше використовуються синхронні генератори з постійними магнітами (СГПМ / PMSG) завдяки їх високій ефективності та надійності. Динаміка просторового вектора струму статора СГПМ, виражена через його проекції на осі синхронної системи координат d-q, що обертається разом з ротором, описується диференціальними рівняннями:

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (2.8)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \Psi_m \quad (2.9)$$

де: u_d, u_q, i_d, i_q – напруги та струми статора по осях d та q;

R_s – активний опір обмотки статора, Ом;

L_d, L_q – індуктивності статора по осях d та q, Гн;

$\omega_e = p \cdot \omega_{\text{ген}}$ – електрична кутова швидкість (де p – кількість пар полюсів);

Ψ_m – потокозчеплення постійних магнітів, Вб.

Електромагнітний момент генератора $T_{\text{ем}}$, який безпосередньо утримує вантаж від вільного падіння, визначається як:

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_{\text{ем}} = \frac{3}{2} p (\Psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (2.10)$$

Електрична потужність на клеммах генератора, яка після випрямлення та подальшого перетворення до змінного струму передається в мережу, становить:

$$P_{\text{ген}} = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \quad (2.11)$$

Активна потужність, що надходить до енергосистеми, розраховується з урахуванням ККД силового перетворювача (інвертора) $\eta_{\text{інв}}$:

$$P_{\text{мер}} = P_{\text{ген}} \cdot \eta_{\text{інв}} \quad (2.12)$$

2.5 Розрахунок режимів роботи ГНЕ

Для верифікації розробленої математичної моделі гравітаційного накопичувача було проведено серію дослідів. В якості базового сценарію обрано твердотільну блочну систему промислового масштабу (аналог Energy Vault).

Вихідні параметри системи для проведення дослідів:

Маса одного блоку $M = 35\,000 \text{ кг} = 35 \text{ тонн}$.

Висота підйому/опускання $H = 100 \text{ м}$.

Номінальна швидкість стабільного руху $v_{\text{ном}} = 2.1 \text{ м/с}$.

Прискорення на етапі розгону/гальмування $a: 0.5 \text{ м/с}^2$.

Механічний ККД (лебідка + редуктор) $\eta_{\text{мех}} = 0.95$.

Електричний ККД (генератор + інвертор) $\eta_{\text{ел}} = 0.92$.

Дослід 1: Розрахунок процесу розряду (Генераторний режим)

Метою дослідів є визначення часу розряду, генерованої потужності та загального обсягу виробленої електроенергії при опусканні одного блоку.

Крок 1. Аналіз кінематики руху.

Згідно з прийнятою моделлю (рис. 2.3), рух поділяється на етапи:

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Етап прискорення.

Час розгону до номінальної швидкості:

$$t_1 = \frac{v_{\text{ном}}}{a} = \frac{2.1}{0.5} = 4.2 \text{ с.}$$

Пройдений шлях за цей час:

$$h_1 = \frac{a \cdot t_1^2}{2} = \frac{0.5 \cdot 4.2^2}{2} = 4.41 \text{ м.}$$

Етап гальмування.

Оскільки прискорення симетричне, $t_3 = 4.2 \text{ с}$, $h_3 = 4.41 \text{ м}$.

Етап стабільної генерації.

Шлях, який вантаж проходить з постійною швидкістю:

$$h_2 = H - h_1 - h_3 = 100 - 4.41 - 4.41 = 91.18 \text{ м.}$$

Час стабільного руху:

$$t_2 = \frac{h_2}{v_{\text{ном}}} = \frac{91.18}{2.1} \approx 43.42 \text{ с.}$$

Загальний час циклу опускання одного блоку:

$$T = t_1 + t_2 + t_3 = 4.2 + 43.42 + 4.2 = 51.82 \text{ с.}$$

Крок 2. Розрахунок потужності.

Запас потенційної енергії блоку:

$$W_6 = M \cdot g \cdot H = 35000 \cdot 9.81 \cdot 100 = 34.335 \text{ МДж (або } \approx 9.54 \text{ кВт} \cdot \text{год)}.$$

Номінальна механічна потужність, яку забезпечує падаючий вантаж на етапі стабільного руху:

$$P_{\text{мех}} = M \cdot g \cdot v_{\text{ном}} = 35000 \cdot 9.81 \cdot 2.1 = 721035 \text{ Вт} \approx 721 \text{ кВт.}$$

Активна електрична потужність, що генерується в енергосистему на етапі стабільної генерації (з урахуванням втрат):

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{\text{вих}} = P_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{ел}} = 721 \cdot 0.95 \cdot 0.92 = 630.15 \text{ кВт.}$$

Опускання одного блоку масою 35 тонн з висоти 100 м дозволяє генерувати стабільну потужність понад 630 кВт у мережу протягом 43 секунд. Для забезпечення безперервної генерації багатопроменевий кран (рис. 2.1) повинен опускати блоки послідовно із затримкою, що дорівнює часу одного циклу.

Дослід 2: Розрахунок процесу заряду

Метою дослід є розрахунок потужності, яку система споживає з мережі під час надлишку генерації (наприклад, від СЕС), та визначення ефективності кругового циклу (Round-Trip Efficiency - RTE).

Крок 1. Розрахунок споживаної потужності.

Щоб підняти масу 35 000 кг зі швидкістю 2.1 м/с, електродвигун повинен подолати силу тяжіння та всі механічні втрати: тертя у підшипниках підіймального барабана, втрати в зубчастому зачепленні редуктора та опір у напрямних. Необхідна механічна потужність на валу барабана залишається $P_{\text{мех}} = 721$ кВт. При цьому електрична потужність, необхідна на вході інвертора, розраховується з урахуванням коефіцієнтів корисної дії механічної передачі, електродвигуна та самого інвертора:

$$P_{\text{вх}} = \frac{P_{\text{мех}}}{\eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{ел}}} = \frac{721}{0.95 \cdot 0.92} = 824.9 \text{ кВт.}$$

Крок 2. Розрахунок ККД повного циклу.

ККД повного циклу (η_{RTE}) показує, який відсоток від спожитої енергії система здатна повернути в мережу:

$$\eta_{\text{RTE}} = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{630.15}{824.9} = 0.763 \text{ (або 76.3\%).}$$

Розрахунок показав, що ККД повного циклу твердотільної гравітаційної системи становить близько 76-80%. Це робить її висококонкурентною порівняно з ГАЕС (70-75%) [4] та пневматичними накопичувачами CAES (50-60%), поступаючись лише літій-іонним батареям (85-90%).

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дослід 3: Дослідження впливу зміни маси вантажу на регулювальні характеристики мережі

Метою досліду є оптимізація маси блоку (М) для системи, в якій використовується генератор із номінальною електричною потужністю $P_{ном} = 1000$ кВт (1 МВт). Якщо інвертор видає максимум 1000 кВт, то максимальна дозволена механічна потужність падаючого вантажу:

$$P_{мех_max} = \frac{1000}{0.95 \cdot 0.92} = 1144 \text{ кВт.}$$

Оскільки $P_{мех} = M \cdot g \cdot v$, швидкість спуску буде залежати від обраної маси вантажу за формулою:

$$v = \frac{P_{мех_max}}{M \cdot g} = \frac{1144 \cdot 10^3}{M \cdot 9.81}$$

Складемо таблицю сценаріїв (табл. 2.1):

Сценарій А (Легкий вантаж): $M = 20$ тонн.

Сценарій Б (Оптимальний): $M = 40$ тонн.

Сценарій В (Надтяжкий вантаж): $M = 80$ тонн.

Таблиця 2.1 – Вплив маси вантажу на параметри генерації ($H = 100$ м, $P_{ген} = 1$ МВт)

Параметр	Сценарій А	Сценарій Б	Сценарій В
Потрібна швидкість спуску v , м/с	5.83	2.91	1.45
Час стабільної генерації t_2 , с	17.1	34.3	68.9
Динамічні навантаження на трос	Екстремальні	Нормальні	Низькі
Кінетична енергія, яку треба погасити	Дуже висока	Помірна	Низька

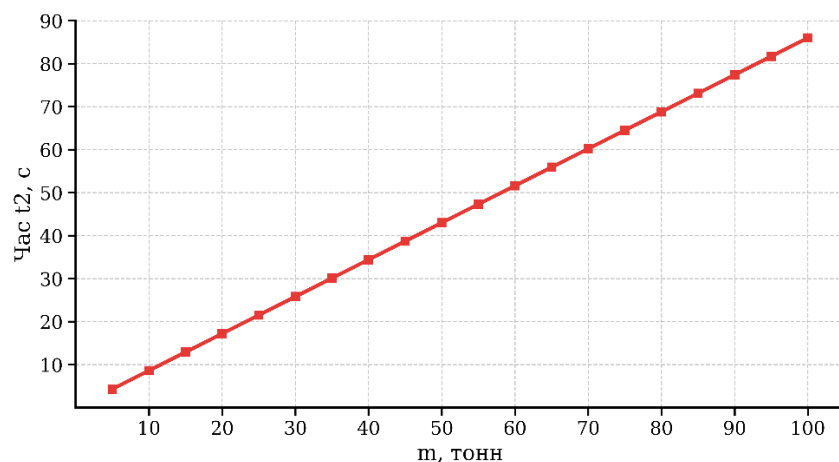


Рисунок 2.5 – Графік залежності часу стабільної роботи від маси вантажу

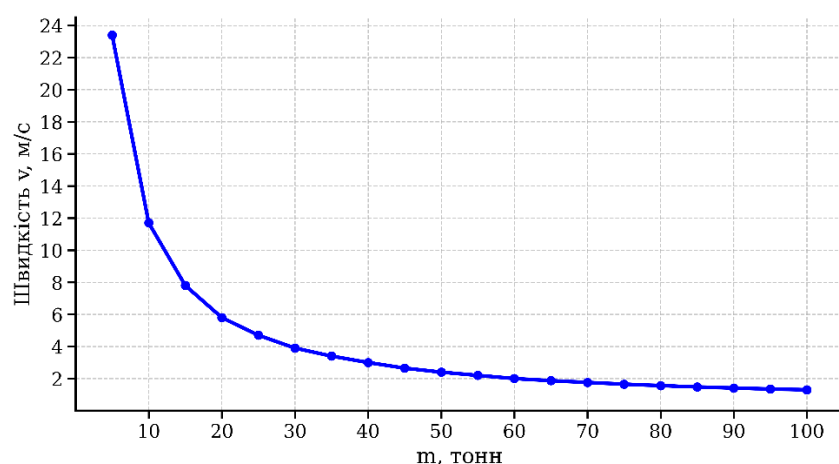


Рисунок 2.6 – Графік залежності швидкості спуску від маси вантажу

Хоча з позиції електромагнітного перетворення генератор забезпечуватиме номінальну вихідну потужність 1 МВт у всіх трьох випадках, вибір маси вантажу є критичним параметром оптимізації системи.

Сценарій А (20 т) зумовлює неприпустимо високу швидкість опускання (близько 6 м/с), що спричинить критичні динамічні навантаження на підймальні механізми та значне розсіювання енергії у гальмівній системі.

Сценарій В (80 т) характеризується сприятливими кінематичними режимами, що мінімізують механічний знос, однак вимагає застосування опорних конструкцій надвисокої вантажопідйомності.

Оптимальним є Сценарій Б (35–40 т), який забезпечує номінальну швидкість руху вантажу (~3 м/с) та гарантує нормований час реакції гравітаційного накопичувача на запити енергосистеми щодо видачі потужності.

2.6 Математична модель взаємодії гравітаційного накопичувача енергії з мікромережею

Для аналізу ефективності роботи гравітаційного накопичувача енергії (ГНЕ) необхідно розглянути його роботу в складі фрагменту енергосистеми (мікромережі), яка включає стохастичну генерацію ВДЕ та змінне навантаження споживачів.

Основним завданням ГНЕ у такій системі є компенсація небалансу потужності для підтримки номінальних значень частоти та напруги в мережі.

Рівняння балансу потужності

Рівнянням, що описує взаємодію елементів мікромережі в будь-який момент часу t , є рівняння балансу активної потужності:

$$P_{\text{ВДЕ}}(t) + P_{\text{м}}(t) \pm P_{\text{ГНЕ}}(t) = P_{\text{сп}}(t)$$

де: $P_{\text{ВДЕ}}$ – сумарна потужність генерації від відновлюваних джерел (наприклад, сонячних та вітрових електростанцій), Вт;

$P_{\text{м}}(t)$ – потужність, що споживається з основної зовнішньої мережі або віддається в неї (для автономного режиму $P_{\text{м}}(t) = 0$), Вт;

$P_{\text{ГНЕ}}(t)$ – електрична потужність гравітаційного накопичувача (додатна при розряді, від'ємна при заряді), Вт;

$P_{\text{сп}}(t)$ – сумарна потужність споживання (навантаження) мікромережі, Вт.

Для спрощення алгоритму керування вводиться поняття величина локального небалансу потужності $\Delta P(t)$, який виникає між генерацією ВДЕ та споживанням:

$$\Delta P(t) = P_{\text{ВДЕ}}(t) - P_{\text{сп}}(t)$$

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Залежно від знака та величини $\Delta P(t)$, система управління формує завдання для системи керування ГНЕ.

2.6.1 Режими роботи ГНЕ в мікромережі

Математичний опис керування ГНЕ поділяється на три основні режими:

1. Режим заряду (Двигунний режим)

Якщо генерація ВДЕ перевищує споживання ($\Delta P(t) > 0$), надлишок енергії використовується для підйому вантажу. Потужність, яку ГНЕ споживає з мережі ($P_{\text{ГНЕ}}^{\text{зар}}$), обмежується його номінальною потужністю ($P_{\text{ном}}$) та наявною вільною ємністю (залишком висоти підйому):

$$P_{\text{ГНЕ}}^{\text{зар}}(t) = \begin{cases} \min(\Delta P(t), P_{\text{ном}}), & \text{якщо } \Delta P(t) \geq P_{\min} \\ 0, & \text{якщо } \Delta P(t) < P_{\min} \end{cases}$$

2. Режим розряду (Генераторний режим)

Якщо споживання перевищує генерацію ($\Delta P(t) < 0$), виникає дефіцит, який компенсується опусканням вантажу. Потужність, яку ГНЕ генерує в мережу ($P_{\text{ГНЕ}}^{\text{роз}}$), визначається модулем небалансу та обмежується технічними характеристиками генератора:

$$P_{\text{ГНЕ}}^{\text{роз}}(t) = \min(|\Delta P(t)|, P_{\text{ном}})$$

3. Режим очікування (Standby)

Якщо баланс виконано ($\Delta P(t) = 0$) або вантаж досяг крайніх точок (максимальної висоти чи землі), механічні гальма фіксують вантаж, і вихідна потужність системи становить: $P_{\text{ГНЕ}}(t) = 0$.

2.6.2 Динаміка накопиченої енергії (рівень заряду)

На відміну від електрохімічних акумуляторів, де стан заряду (SOC) визначається хімічними процесами, ємність ГНЕ є суто механічною і прямо пропорційна поточній висоті підвісу вантажу $h(t)$.

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Рівняння динаміки зміни висоти підвісу вантажу (фактично, стану заряду системи) описується інтегральним рівнянням:

$$h(t) = h(t_0) + \int_{t_0}^t \left(\frac{P_{GES}^{ch}(\tau) \cdot \eta_{зар}}{M \cdot g} - \frac{P_{GES}^{dis}(\tau)}{M \cdot g \cdot \eta_{роз}} \right) dt \quad (2.13)$$

де: $h(t_0)$ – початкова висота вантажу в момент часу t_0 , м;

M – маса вантажу, кг;

g – прискорення вільного падіння, 9.81 м/с²;

$\eta_{зар}$ – загальний ККД системи при підйомі (включає ККД інвертора, електродвигуна, редуктора та лебідки);

$\eta_{роз}$ – загальний ККД системи при опусканні (генерації).

Система керування мікромережею повинна враховувати технологічні обмеження ГНЕ, щоб запобігти аварійним ситуаціям. Відповідно, на параметри стану накладаються такі граничні умови:

$$0 \leq h(t) \leq H_{\max}$$

$$0 \leq v(t) \leq v_{\max}$$

де: $H_{\max}$ – максимально допустима висота підйому блоку в конструкції вежі чи шахти, м;

$v_{\max}$ – максимальна безпечна швидкість лінійного переміщення вантажу, м/с.

2.6.3 Взаємозв'язок електричних та механічних параметрів системи акумулювання

Враховуючи, що мікромережа може миттєво змінювати потужність системи ГНЕ для балансування активної потужності, швидкість переміщення вантажу $v(t)$ стає динамічною змінною, яка системою керування, яка враховує характеристики інвертора. Необхідна миттєва швидкість переміщення для забезпечення заданої потужності розряду розраховується як:

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$v_{\text{необ}}(t) = \frac{P_{\text{ГНЕ}}^{\text{роз}}(t)}{M \cdot g \cdot \eta_{\text{роз}}}$$

Отже, інтелектуальна система керування мікромережею (EMS) безперервно вимірює значення $\Delta P(t)$ та через перетворювач частоти задає відповідну кутову швидкість ротора, що трансформується у лінійну швидкість $v_{\text{необ}}(t)$ для компенсації базової складової небалансу потужності.

Висновки

У даному розділі було проведено аналіз сучасного стану засобів накопичення електроенергії та обґрунтовано доцільність застосування гравітаційних накопичувачів енергії в умовах високої встановленої частки ВДЕ в енергосистемі. Показано, що стохастичний характер генерації ВДЕ призводить до виникнення небалансів потужності, зниження інерційності енергосистеми та погіршення показників якості електроенергії, що потребує впровадження сучасних засобів балансування, серед яких важливу роль відіграють системи накопичення енергії.

На основі аналізу існуючих технологій накопичення енергії встановлено, що гравітаційні накопичувачі поєднують довговічність механічних систем, екологічну безпечність та можливість масштабування без суттєвих географічних обмежень. Це дозволяє розглядати їх як перспективний елемент сучасних інтелектуальних енергосистем.

Розроблено математичну модель баштової системи гравітаційного накопичення енергії, що описує процес перетворення потенційної енергії вантажу в електричну з урахуванням кінематичних параметрів руху, обмежень генератора та втрат у механічній та електричній підсистемах. Сформовано рівняння механічної підсистеми на основі другого закону Ньютона та рівняння обертального руху приводу генератора, а також рівняння електричної підсистеми синхронного генератора з постійними магнітами у координатах $d-q$, що дозволяє описати електромагнітні процеси перетворення енергії.

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проведені розрахункові дослідження режимів роботи гравітаційного накопичувача дозволили визначити основні енергетичні характеристики системи, зокрема потужність генерації, тривалість циклу роботи та кругову ефективність перетворення енергії. Встановлено, що оптимальний вибір маси вантажу забезпечує узгодження механічних параметрів системи з обмеженнями генератора та дозволяє підвищити ефективність роботи накопичувача в енергосистемі.

Крім того, розроблено математичну модель взаємодії гравітаційного накопичувача енергії з мікромережею, яка базується на рівнянні балансу активної потужності та враховує режими заряду, розряду та очікування накопичувача. Показано, що швидкість переміщення вантажу є керованою змінною, яка визначає миттєву потужність накопичувача та забезпечує компенсацію небалансів активної потужності між генерацією відновлюваних джерел енергії та навантаженням споживачів.

Отримані результати математичного моделювання підтверджують ефективність застосування гравітаційних накопичувачів енергії як засобу підвищення гнучкості та надійності роботи локальних енергосистем і можуть бути використані для подальшого дослідження режимів їх функціонування та оптимізації параметрів у складі сучасних енергетичних мереж.

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЕНЕРГОСИСТЕМИ З ГРАВІТАЦІЙНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

3.1. Опис імітаційної моделі мікромережі

Для проведення досліджень перехідних та усталених процесів в електроенергетичній системі з високою часткою ВДЕ, у середовищі MATLAB/Simulink було розроблено комплексну імітаційну модель мікромережі (рис. 3.1).

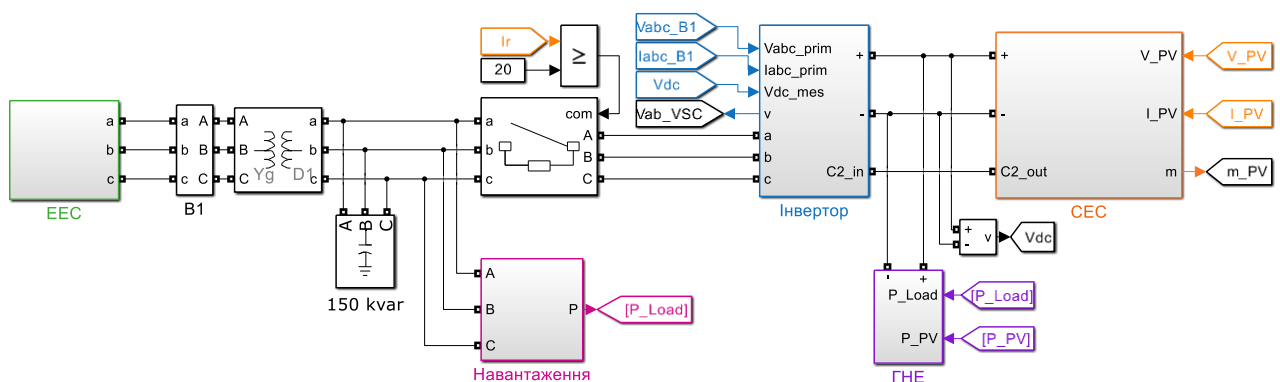


Рисунок 3.1 – Структурна схема моделі мікромережі

Топологія розробленої моделі базується на архітектурі зі спільною шиною змінного струму та включає наступні основні структурні блоки:

3.1.1 Сонячна електростанція (СЕС)

Модель СЕС представлена як джерело активної потужності (рис. 3.2), що залежить від рівня інсоляції. Вона складається з масиву фотоелектричних панелей, підключених через DC/DC підвищувальний перетворювач (Boost Converter). Керування перетворювачем здійснюється за алгоритмом пошуку точки максимальної потужності (MPPT – Maximum Power Point Tracking), що гарантує максимальну ефективність відбору енергії від сонця за будь-яких умов.

					141.ЕК2110.010.ДБ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Яковенко А.В.			Дослідження участі гравітаційного накопичувача енергії у балансуванні активної потужності				Лім.		Арк.	Аркушів
Перевір.		Гулий В.С.									56	78
Реценз.									КПІ «ім. Ігоря Сікорського» група ЕК-21			
Н. Контр.		Ягельський Є.О.										
Затверд.		Дерев'яно Д.Г.										

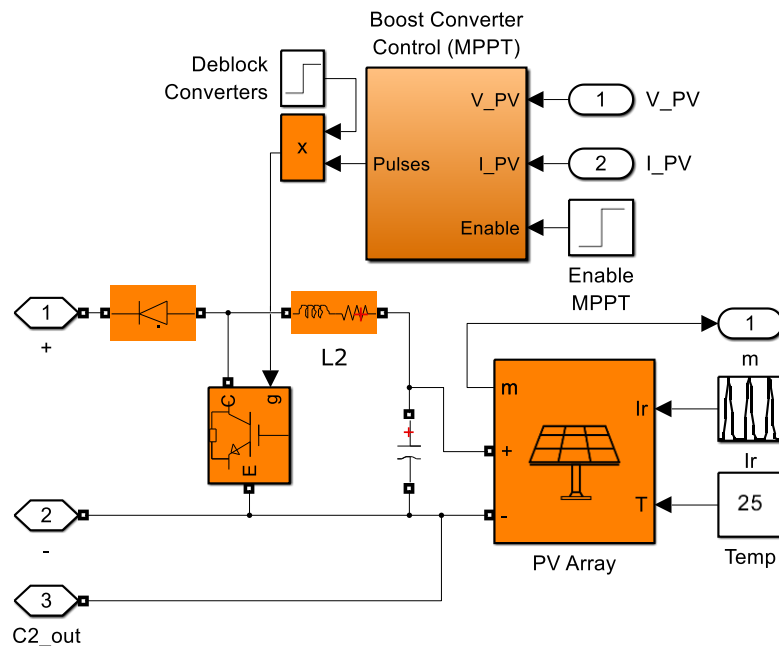


Рисунок 3.2 – Структурна схема моделі СЕС

3.1.2 Мережевий інвертор (VSC) та DC-ланка

Зв'язок між ГНЕ, СЕС та зовнішньою енергосистемою забезпечується через трифазний інвертор напруги (3-Level Bridge). На стороні мережі постійного струму інвертор підключений до конденсаторної батареї ланки постійного струму (DC-link), яка забезпечує формування середньої точки для трирівневої топології та стабілізує напругу. Зі сторони змінного струму інвертор обладнаний згладжувальним L-фільтром для зменшення вищих гармонік, викликаних високочастотною комутацією транзисторів.

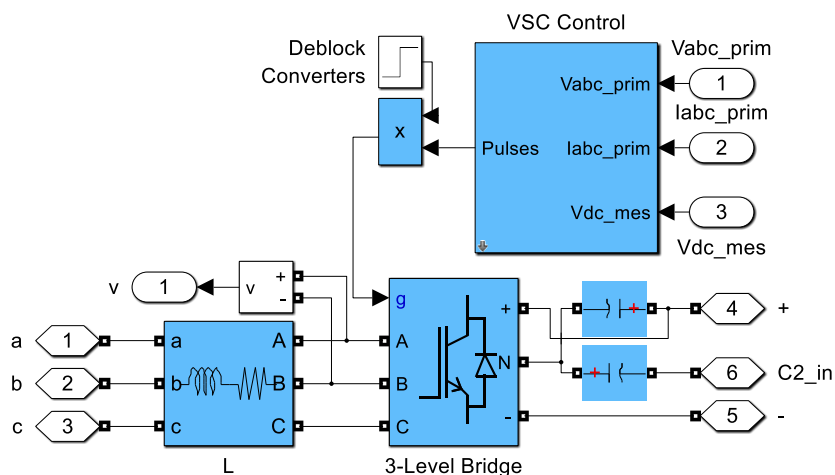


Рисунок 3.3 – Структурна схема моделі трифазного інвертора напруги

3.1.3 Локальне навантаження

Локальне навантаження є еквівалентом споживачів мікромережі. У моделі навантаження використовується блок динамічного трифазного навантаження, який дозволяє імітувати добові графіки споживання активної потужності.

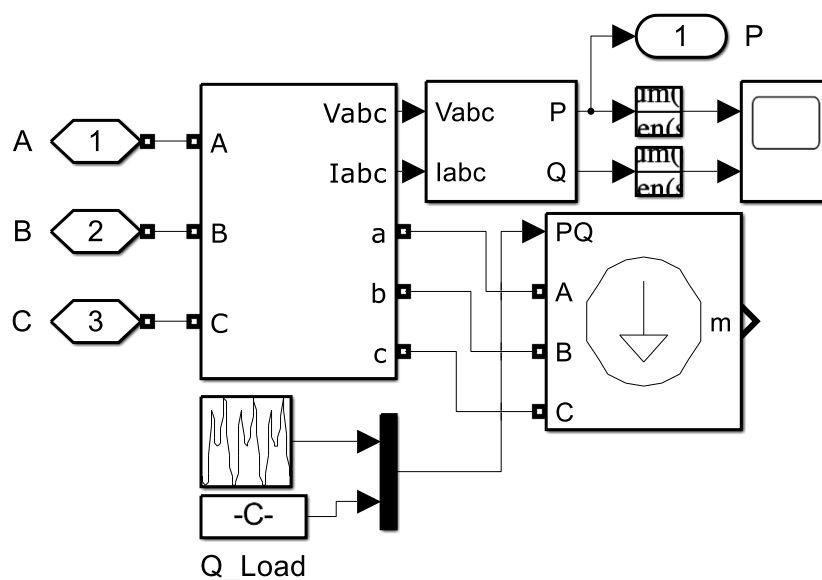


Рисунок 3.4 – Структурна схема моделі навантаження

3.1.4 Трансформаторне обладнання

Зв'язок між елементами мікромережі здійснюється через силові трансформатори. Мікромережа підключена до ЕЕС через підвищувальний трансформатор 0.4/10 кВ номінальною потужністю 3 МВА.

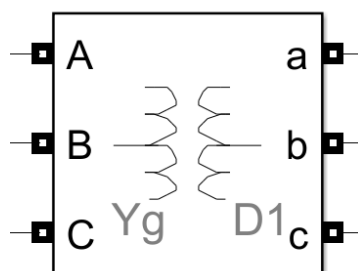


Рисунок 3.5 – Трансформатор 10/0.4кВ між ЕЕС та мікромережею

3.1.5 Блок зовнішньої енергосистеми (ОЕС)

Зовнішня енергосистема представлена еквівалентом трифазного джерела нескінченної потужності з послідовно підключеною лінією електропередачі

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

(П-подібна схема заміщення) довжиною 40 км та вимикачем. Цей блок програмно відключається під час дослідження ізольованого режиму та вводиться в роботу для аналізу паралельного режиму роботи мікромережі із зовнішньою енергосистемою.

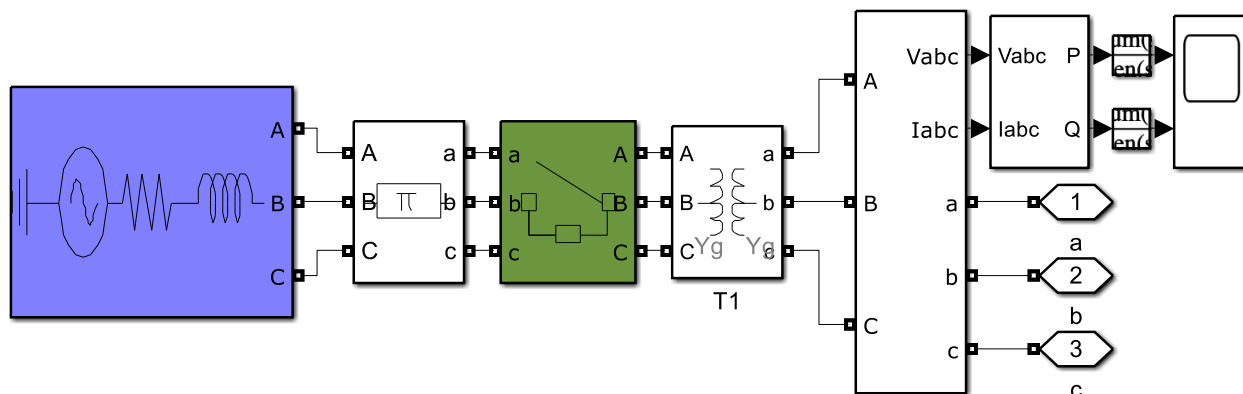


Рисунок 3.6 – Структурна схема моделі зовнішньої енергосистеми

3.1.6 Система керування мікромережі (EMS)

Система керування мікромережі реалізована на базі функції MATLAB (ems_control) (рис. 3.7). Блок безперервно отримує дані про поточний баланс активної потужності мережі. На основі цих даних та поточного рівня заряду накопичувача система керування згідно алгоритму EMS (рис. Б.1) розраховує необхідну потужність компенсації та формує референсний сигнал керування P_{ref} , який у подальшому перетворюється на завдання струму I_{ref} для силового інвертора.

3.1.7 Гравітаційний накопичувач енергії (ГНЕ)

Накопичувальним елементом системи є твердотільний гравітаційний накопичувач енергії (рис. 3.7). ГНЕ проектується на базі інфраструктури репрофільованої закритої шахти. Такий підхід дозволяє радикально знизити капітальні витрати на будівництво системи, використовуючи вже існуючий вертикальний ствол для переміщення вантажу.

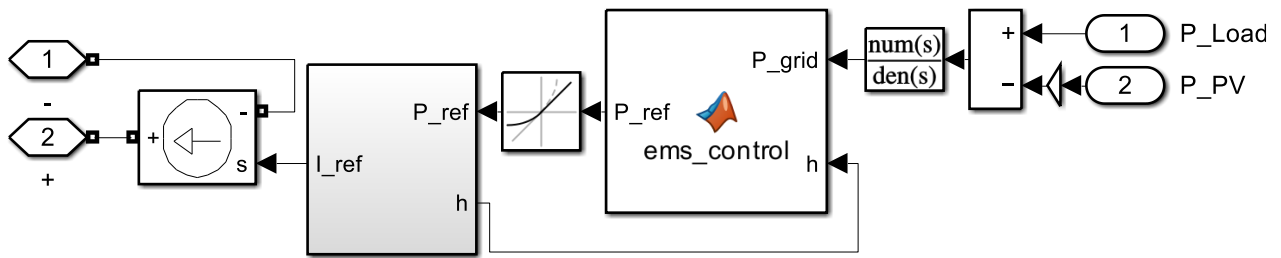


Рисунок 3.7 – Структурна схема гравітаційного накопичувача енергії

Як накопичувальний елемент використовується масивне тверде тіло масою 6000 т, що переміщується у вертикальному стволі глибиною 550 м. Обрані масо-габаритні параметри відповідають типовим геометричним характеристикам промислових шахтних стволів та забезпечують компроміс між енергоємністю системи, допустимими механічними навантаженнями та швидкодією електромеханічного приводу.

Принцип роботи системи базується на перетворенні надлишків електричної енергії від СЕС у потенційну енергію масивного тіла: у режимі заряду лебідка піднімає вантаж вгору, а в режимі розряду вантаж опускається під дією сили тяжіння, обертаючи ротор двигуна, який переходить у генераторний режим і віддає електроенергію в мікромережу.

Модель враховує обмеження робочого ходу вантажу, максимальну швидкість переміщення та наявність зони динамічного гальмування поблизу граничних положень. У разі досягнення нижньої межі робочого ходу система поступово втрачає можливість підтримувати необхідний рівень генерації, що відповідає повній розрядці.

Для часткового забезпечення потреб в електроенергії досліджуваної мікромережі у таблиці 3.1 приведені масо-габаритні та кінематичні параметри моделі ГНЕ.

Таблиця 3.1 – Параметри ГНЕ

Назва параметра	Позначення	Значення
Маса робочого тіла	m	6000 т
Загальна глибина існуючої шахти	-	550 м
Верхня гранична позначка (100% заряду)	$h_{\max}$	-5 м
Нижня гранична позначка (0% заряду)	$h_{\min}$	-513 м
Ефективний робочий хід вантажу	Δh	508 м
Теоретична повна енергоємність	E	8.3 МВт·год
Максимальна лінійна швидкість руху	$v_{\max}$	0.05 м/с
Довжина зони динамічного гальмування	-	20 м

3.2 Моделювання роботи мікромережі в ізолюваному режимі

Ізолюваний (автономний) режим роботи мікромережі виникає у випадках відключення від централізованої енергосистеми внаслідок аварійних ситуацій або цілеспрямованого переходу в острівний режим роботи. У такому режимі у мікромережі повинен забезпечуватись баланс активної потужності, а також підтримувати номінальні параметри напруги та частоти.

У досліджуваній системі застосовано архітектура зі спільною шиною постійного струму. Сонячна електростанція (СЕС) та гравітаційний накопичувач енергії (ГНЕ) підключені до спільної шини напругою 800 В. Електроенергія від шини перетворюється мережевим інвертором (VSC) у напругу змінного струму величиною 400 В, після чого через підвищувальний трансформатор 0.4/10 кВ подається в локальну розподільчу мережу мікромережі. Безпосередньо перед вузлом споживачів встановлено понижувальний трансформатор 10/0.4 кВ. Дана лінія 10 кВ використовується для зв'язку з централізованою енергосистемою при паралельному режимі роботи мікромережі із зовнішньою енергосистемою.

В ізолюваному режимі роботи мікромережі інвертор переходить у режим

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

автономної роботи, підтримуючи рівень напруги змінного струму та частоти на номінальному значенні. Водночас, критично важливою умовою стабільної роботи інвертора є підтримка балансу потужності на загальній DC-шині, щоб не допустити колапсу напруги [20].

Цю функцію виконує система керування мікромережі (EMS), керуючи гравітаційним накопичувачем. В ізолюваному режимі згідно алгоритму система не використовує граничні значення обмеження потужності, а зобов'язана миттєво компенсувати різницю між споживанням навантаження та генерацією СЕС, підтримуючи баланс активної потужності згідно:

$$P_{\text{ГНЕ}} = P_{\text{Н}} - P_{\text{СЕС}}, \quad (3.1)$$

де: $P_{\text{ГНЕ}}$ – потужність ГНЕ (додатне значення відповідає розрядці, від'ємне — зарядці);

$P_{\text{Н}}$ – активна потужність споживачів мікромережі;

$P_{\text{СЕС}}$ – поточна потужність генерації СЕС.

Відповідно до розробленої моделі, ГНЕ автоматично перемикається між режимами підйому вантажу (акумуляування надлишків енергії від СЕС у денний час) та опускання вантажу (покриття всього дефіциту потужності у вечірній час), виступаючи головним та єдиним балансиrom ізолюваної мікромережі.

Для підтвердження ефективності розробленого алгоритму керування було проведено добове симуляційне моделювання роботи мікромережі в середовищі MATLAB Simulink. Аналіз отриманих результатів включає: енергетичний баланс, механічні показники накопичувача та електротехнічні параметри мережі.

3.2.1 Аналіз балансу активної потужності мікромережі

На рис. 3.8 наведено добові графіки активної потужності генерації СЕС, навантаження споживачів та потужності ГНЕ.

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

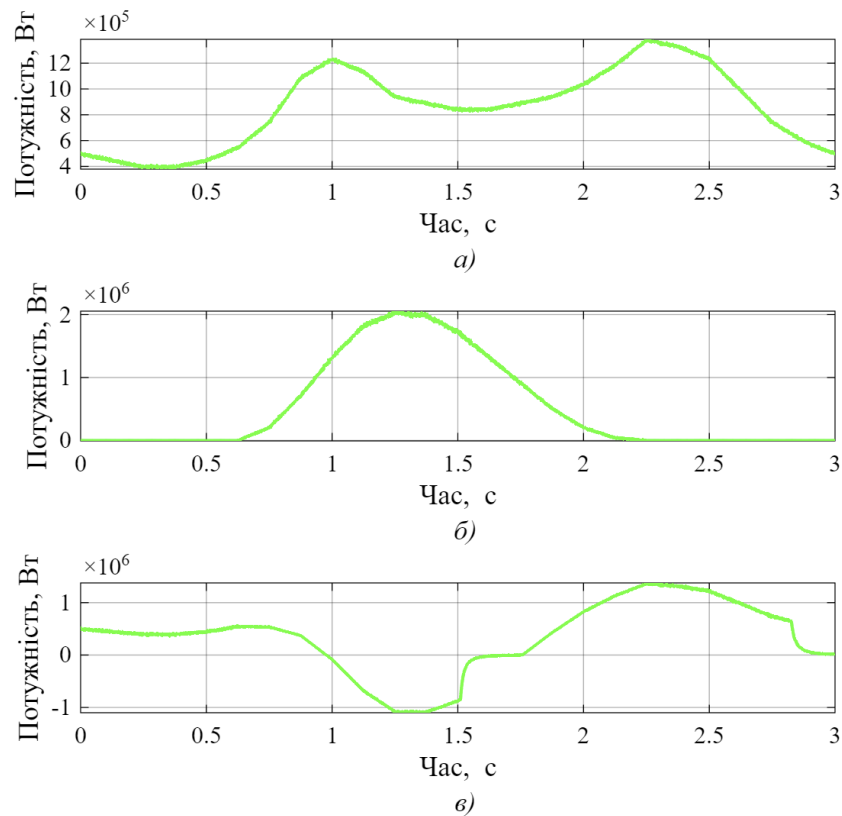


Рисунок 3.8 – Добові графіки активних потужностей системи:

а – Навантаження; б – СЕС; в – ГНЕ

Аналіз отриманих графіків дозволяє виявити два критичні недоліки функціонування мікромережі в ізольованому режимі:

Втрата профіцитної енергії: У період максимальної сонячної генерації (близько 1.5-1.6с) ГНЕ повністю заряджається, досягаючи верхнього граничного значення. Оскільки накопичувач фізично не здатний приймати подальший надлишок, значна частина енергії СЕС не використовується і втрачається.

Дефіцит ємності: Під час проходження вечірнього максимуму споживання (на позначці 2.8с) накопичувач вичерпує свій запас до 0% і зупиняється. Це призводить до різкого падіння потужності та знеструмлення мікромережі до появи першої ранкової генерації СЕС.

Отримані результати підтверджують характерну особливість твердотільних накопичувачів: ГНЕ є високоефективним інструментом для динамічного балансування системи та компенсації короточасних піків активної

потужності (Peak Shaving), однак він не може слугувати єдиним довготривалим джерелом енергії.

Пропорційне збільшення масо-габаритних параметрів накопичувача з метою повного покриття нічного споживання мікрорайону є технічно нераціональним. Капітальні витрати на створення гіпертрофованої інфраструктури будуть економічно необґрунтованими та з великим терміном окупності за рахунок оптимізації енергоспоживання.

З огляду на це, досліджувана мікромережа не здатна підтримувати довготривалий ізольований режим роботи виключно за рахунок СЕС та ГНЕ. Перехід в автономний режим є технічно виправданим лише короткочасно – для забезпечення безперебійного живлення на час ліквідації аварійних ситуацій в основній мережі. Для реалізації повноцінного ізольованого режиму архітектуру мікромережі необхідно доповнити гарантованим джерелом електроенергії, наприклад, дизель-генераторною установкою (ДГУ).

Саме тому в базовому сценарії, для максимізації економічного ефекту від використання ВДЕ та надійного забезпечення споживачів, мікромережа повинна функціонувати паралельно з Об'єднаною енергосистемою (ОЕС), що розглядається в наступному підрозділі.

3.2.2 Аналіз електрофізичних параметрів та якості електроенергії мікромережі

Окрім оцінки загального балансу активної потужності, критично важливим етапом дослідження є аналіз стабільності параметрів режиму у вузлах мікромережі. З цією метою для кожної підсистеми (СЕС, Локальне навантаження, ГНЕ) було отримано результати параметрів режиму, у тому числі графіки активної потужності, лінійної напруги та фазного струму (рис. 3.9 – 3.11).

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

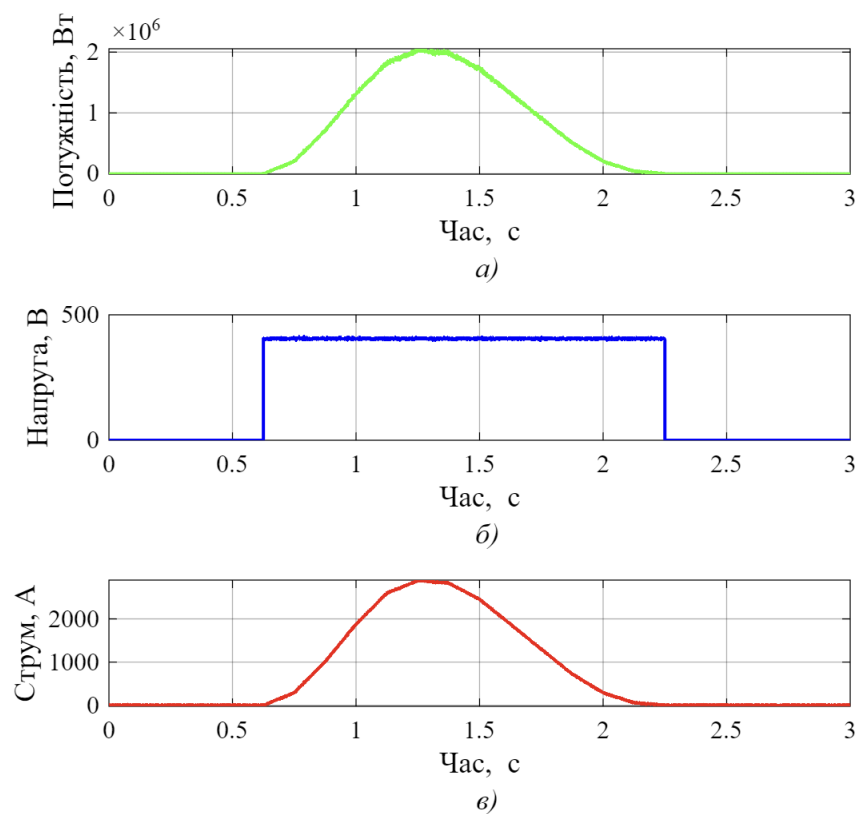


Рисунок 3.9 – Характеристики СЕС: а – Потужність; б – Напруга; в – Струм

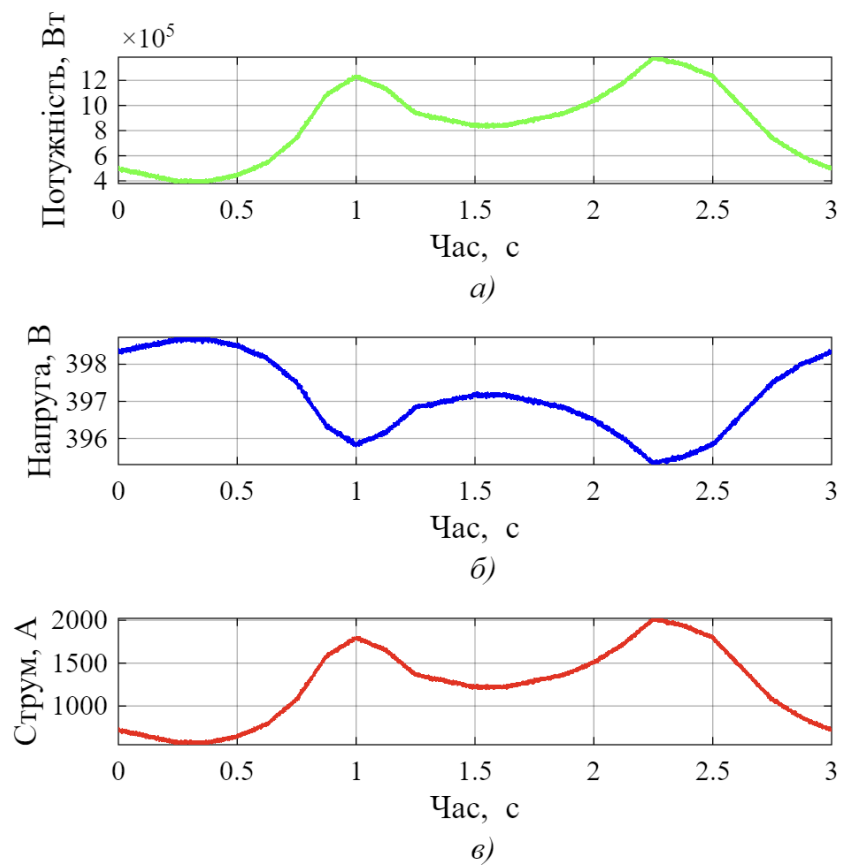


Рисунок 3.10 – Характеристики локального навантаження: а – Потужність;
б – Напруга; в – Струм

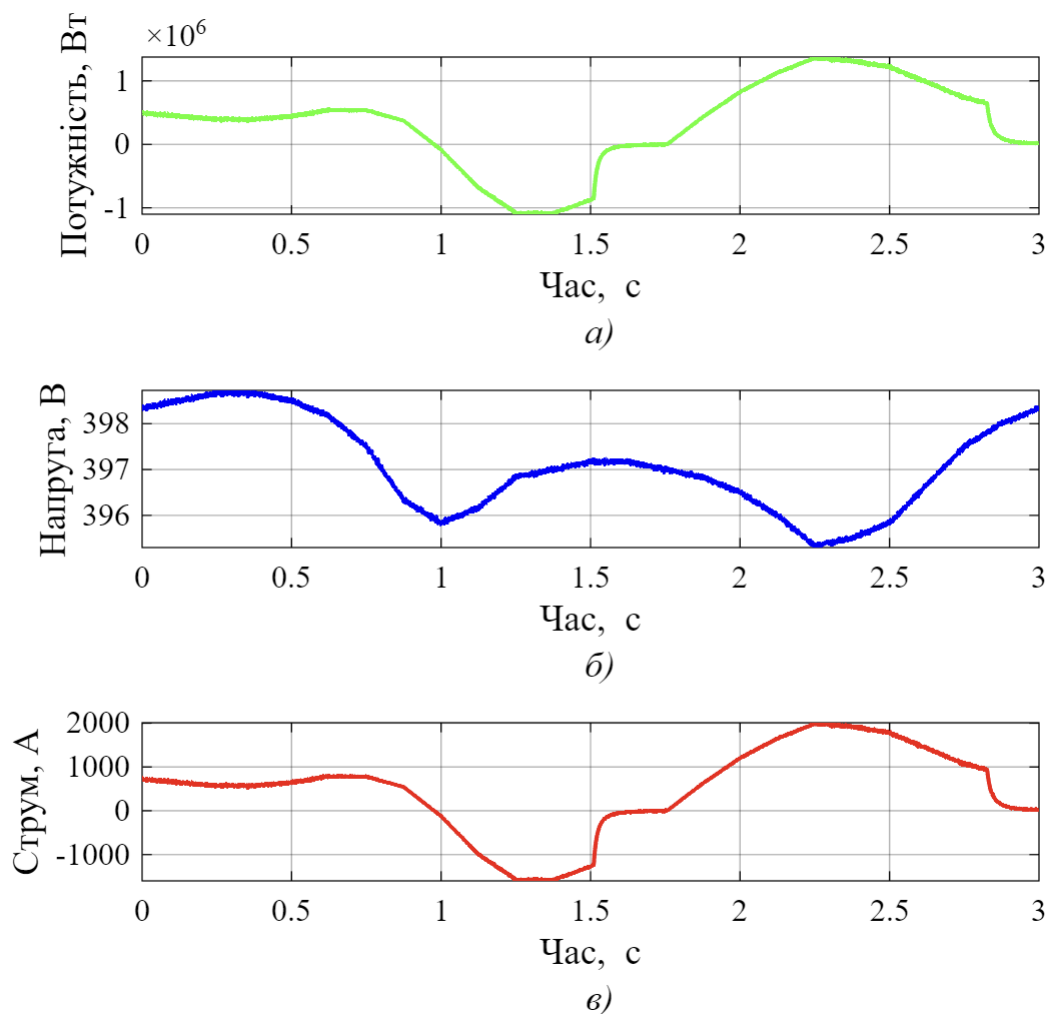


Рисунок 3.11 – Характеристики ГНЕ: а – Потужність;
б – Напруга; в – Струм

Аналіз даних результатів дозволяє зробити наступні висновки щодо адекватності розробленої моделі:

Як видно з графіків напруги (рис. 3.9 – 3.11), незважаючи на значні коливання потужності, система керування мережевим інвертором успішно виконує функцію контролю та підтримки параметрів режиму мікромережі у допустимих межах. Рівень напруги на загальній шині змінного струму підтримується в межах номінальних значень (~ 400 В). Незначні зниження напруги (до 395 В) під час максимального вечірнього споживання є допустимими і повністю задовольняють вимоги стандартів якості електроенергії [21].

На графіках (рис. 3.9 – 3.11) приведено зміни змінного струму. Максимальні струмові навантаження у вечірній пік досягають значення понад 2000 А.

Узгоджена динаміка змін активної потужності, напруги та струму підтверджує, що розроблена система виконує поставлені завдання підтримки заданих параметрів режиму у допустимих межах. Перехідні процеси, зумовлені роботою силової електроніки, протікають без виникнення небезпечних комутаційних перенапруг чи струмових резонансів.

3.2.3 Аналіз кінематичних параметрів накопичувача

На рис. 3.12 приведені графіки зміни механічних параметрів ГНЕ – швидкості переміщення та поточної висоти вантажу.

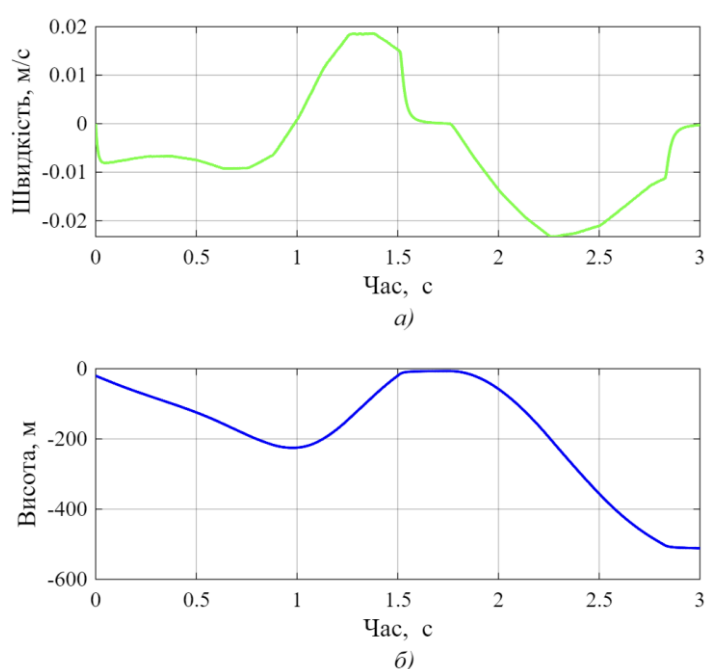


Рисунок 3.12 – Параметри робочого тіла: а – швидкість; б – висота

Аналіз отриманих результатів показав, що система враховує задані кінематичні обмеження. Швидкість руху вантажу регулюється плавно і не перевищує встановленого обмеження. Крім того, графік висоти демонструє спрацювання захисту за рівнем заряду (SoC):

У період надлишку генерації СЕС вантаж досягає верхньої позначки буферної зони, після чого швидкість знижується до нуля.

Під час вечірнього пікового значення навантаження вантаж опускається до граничної позначки $h_{\min} = -513$ м, що ініціює повне гальмування системи та пояснює подальшу втрату електричної потужності в ізольованій мікромережі.

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Синхронність механічних та електричних перехідних процесів підтверджує високу точність розробленої моделі.

3.3 Моделювання роботи мікромережі в паралельному режимі

Оскільки функціонування мікромережі в повністю ізольованому режимі є економічно недоцільним через потребу в значному збільшенні ємності накопичувача, подальші дослідження проводились для режиму паралельної роботи мікромережі із зовнішньою енергосистемою (ОЕС).

У паралельному режимі СЕС та ГНЕ перестає бути єдиним джерелом генерації та формування напруги. Алгоритм системи керування мережі (EMS) змінюється порівняно з алгоритмом для ізольованого режиму роботи: ГНЕ переходить в режим динамічного балансування та компенсації пікового навантаження (Peak Shaving). Його головна мета – мінімізувати перетік потужності із зовнішньої енергосистеми та вирівняти перетоки надлишкової потужності мікромережі внаслідок появи профіциту активної потужності у зовнішню енергосистему.

Алгоритм роботи системи керування EMS базується на наступних принципах:

- Обмеження споживання із зовнішньої енергосистеми (Peak Shaving): Для мікромережі програмно встановлено граничне значення перетоку активної потужності із зовнішньої енергосистеми на рівні 400 кВт. Якщо поточний дефіцит потужності менший за це значення, ГНЕ знаходиться в режимі очікування, а живлення споживачів забезпечує зовнішня енергосистема. У разі збільшення значення дефіциту активної потужності більше 400 кВт, EMS активує режим розряду ГНЕ. Накопичувач генерує необхідну кількість потужності, якої не вистачає для покриття пікового значення навантаження мікромережі.
- Обмеження максимального значення перетоку потужності у зовнішню енергосистему (Zero Export): У денний час генерація СЕС суттєво перевищує локальне споживання. Щоб запобігти перевищенню обмеження

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

по перетоку потужності у зовнішню енергосистему, що може викликати локальні перенапруги та втрату статичної стійкості, EMS налаштовано на споживання надлишку потужності. Весь профіцит енергії спрямовується на роботу підйомного механізму для підйому вантажу, обмежуючи перетік потужності у зовнішню енергосистему на встановленому рівні.

Запропонований підхід дозволяє зменшити перевантаження лінії зв'язку мікромережі з зовнішньою енергосистемою та підвищити стійкість ОЕС.

Для аналізу ефективності запропонованого алгоритму розглянемо графіки обміну активною потужністю із зовнішньою мережею, а також режим роботи ГНЕ. На рис. 3.13 наведено графік зміни перетоку потужності міжсистемної лінії електропередач.

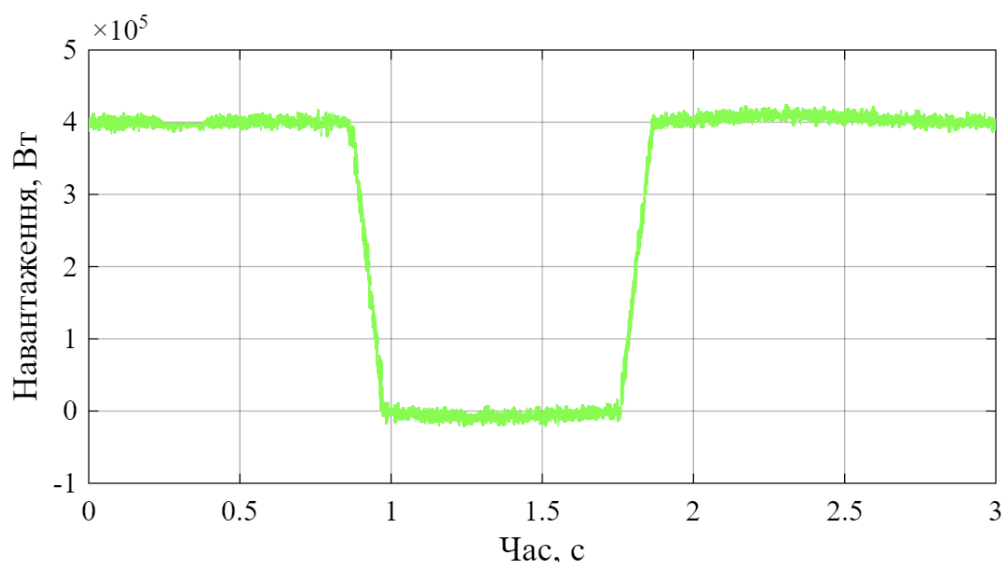


Рисунок 3.13 – Навантаження ЕЕС

Аналіз результатів дослідження підтвердив коректність роботи системи керування EMS. Зміна навантаження на зовнішню мережу чітко розділяється на три характерні зони:

- Зниження завантаженості міжсистемної лінії при пікових навантаженнях у мікромережі: У періоди, коли власне споживання мікромережі значно перевищує рівень генерації СЕС (сягаючи 1.4 МВт), навантаження на ввідний трансформатор зовнішньої енергосистеми має обмеження по максимально-допустимому рівню активної потужності 400 кВт.

Додатковий дефіцит потужності компенсується за рахунок залучення гравітаційного накопичувача (опусканням вантажу).

- Нульовий експорт: Під час максимальної сонячної активності, коли в системі виникає надлишок потужності, перетік активної потужності у зовнішню мережу знижується до нуля. ГНЕ переходить у режим заряду, споживаючи профіцитну потужність для підняття робочого тіла. Даний режим роботи системи керування дозволяє знизити негативний вплив зміни генерації СЕС на стійкість ЕЕС та коливання частоти в енергосистемі.

Отже, використання розробленого алгоритму керування ГНЕ дозволяє знизити перевантаження лінії зв'язку з зовнішньою енергосистемою у 3.5 рази (з 1.4 МВт до 0.4 МВт), що підвищує стійкість та стабільність частоти в ЕЕС.

На рис. 3.14 наведено електричні характеристики ГНЕ, а на рис. 3.15 – його механічні параметри.

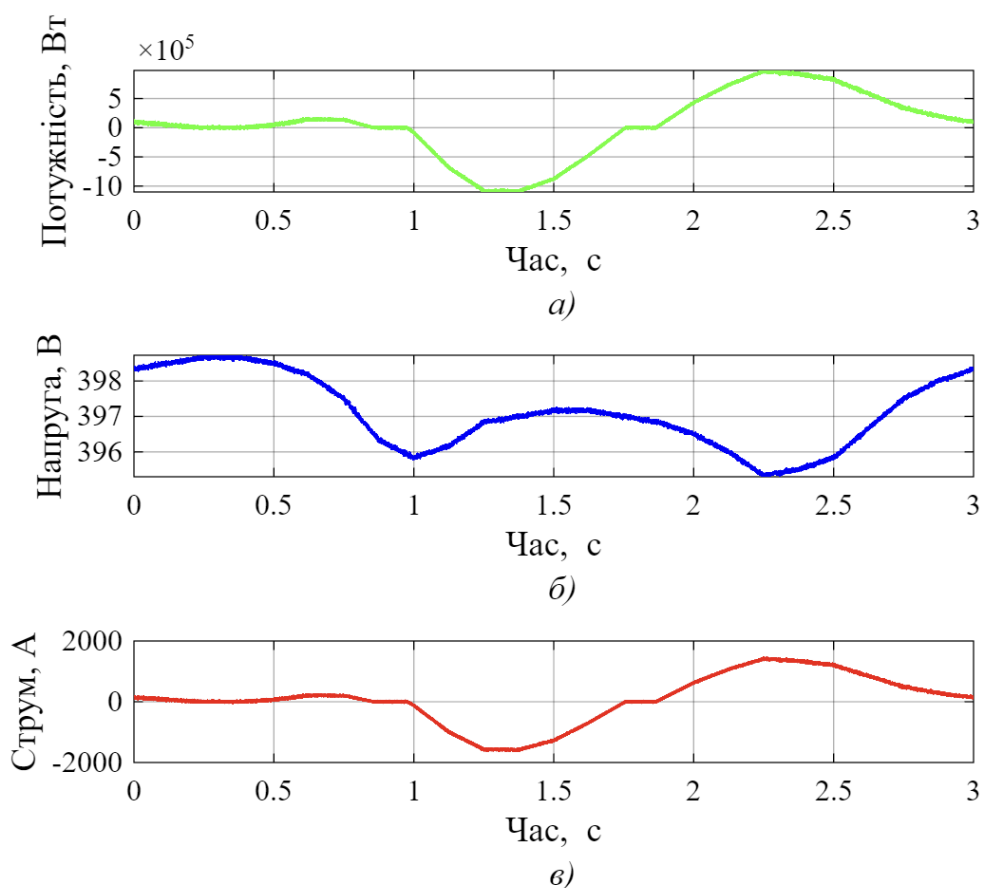


Рисунок 3.14 – Характеристики ГНЕ: а – Потужність; б – Напруга; в – Струм

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

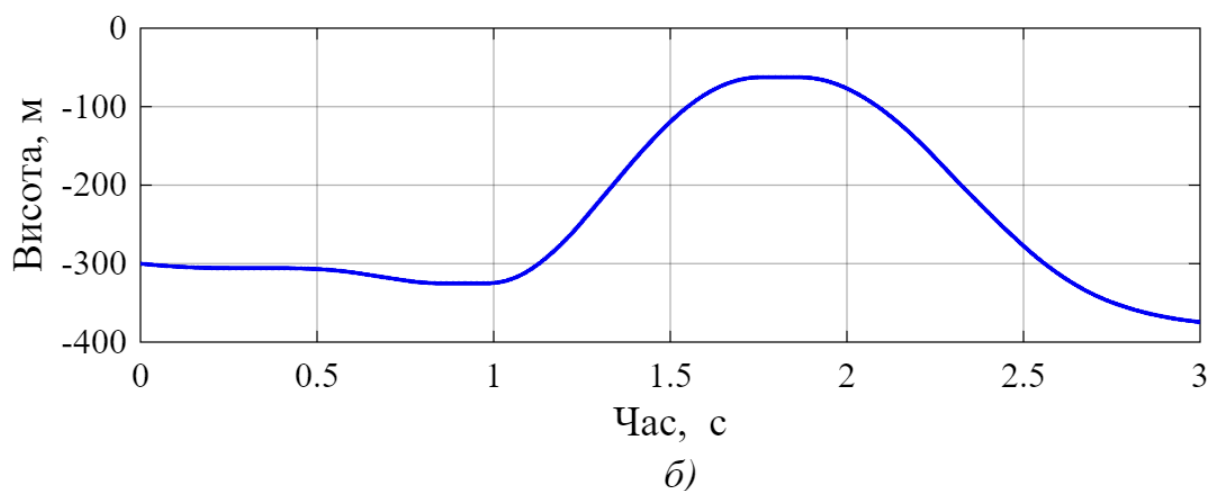
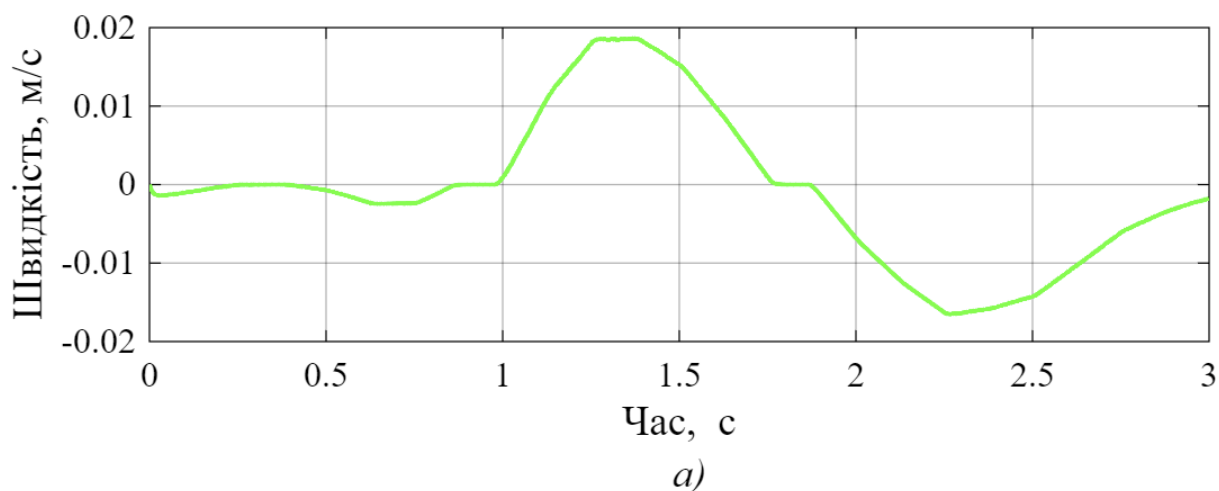


Рисунок 3.15 – Механічні параметри ГНЕ: а – швидкість; б – висота

Аналіз отриманих результатів показав, що при моделюванні зміни навантаження та потужності СЕС спостерігаються інтервали нульової потужності. У ці моменти потужність споживання мікромережі є меншою за дозволений ліміт, тому ГНЕ знаходиться в режимі очікування, зберігаючи свій запас накопиченої енергії. Максимальна потужність в режимі розряду досягає ~1 МВт у вечірні години, а максимальна потужність заряду становить 1.2 МВт при максимальному профіциті електричної потужності.

Напруга на клеммах підтримується у допустимому діапазоні, що є одним із критеріїв якості електроенергії в мікромережі. Максимальний фазний струм досягає амплітудних значень ± 1500 А без короткочасних збільшень понад допустимих значень.

У розглянутих режимах роботи мікромережі лінійна швидкість переміщення робочого тіла ГНЕ змінюється плавно. Її максимальне значення не

перевищує 0.018 м/с, що є значно меншим за гранично допустимі 0.05 м/с. Це гарантує відсутність значних динамічних перевантажень у тросовій системі та продовжує термін служби механічної частини.

Вантаж, маючи початкову позицію -300 м, протягом денного профіциту енергії піднімається до позначки приблизно -60 м. Під час компенсації вечірнього максимуму споживання він плавно опускається до рівня -375 м. Після покриття пікового навантаження система зберігає оперативний резерв ємності, що становить близько 27% від максимального діапазону ходу. Це гарантує додаткову надійність електропостачання мікромережі у разі непередбачуваного продовження тривалості максимуму споживання.

На відміну від ізолюваного режиму роботи, де мікромережа не була спроможною покрити весь небаланс активної потужності при тривалій відсутності генерації СЕС, у паралельному режимі робоче тіло жодного разу не досягло своїх граничних позначок ($h_{\max} = -5$ м та $h_{\min} = -513$ м), що підтверджує правильне визначення масо-габаритних параметрів ГНЕ у досліджуваних режимах роботи мікромережі. Використання ГНЕ дозволяє покривати небаланс у мікромережі без необхідності примусового обмеження генерації СЕС та забезпечує надійне енергопостачання споживачів впродовж доби.

Висновки

У даному розділі проведено комплексне імітаційне моделювання ізолюваного та паралельного режимів роботи мікромережі з гравітаційним накопичувачем енергії (ГНЕ) у середовищі MATLAB/Simulink.

Доведено, що робота системи в повністю автономному режимі супроводжується втратою надлишкової генерації СЕС вдень та знеструмленням споживачів у вечірні години пікових навантажень через повне вичерпання ємності ГНЕ.

Впровадження запропонованого алгоритму роботи системи керування мікромережі (EMS) дозволило залучити ГНЕ до балансування активної

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

потужності у мікромережі, що зменшило максимальне завантаження міжсистемної лінії зв'язку із зовнішньої енергосистеми.

Використання ГНЕ дозволило компенсувати пікове навантаження та вирівняти графік потужності у міжсистемній лінії при значних коливаннях потужності генерації СЕС.

Застосування розробленого алгоритму керування дозволило знизити максимальне навантаження на зовнішню енергосистему більш ніж у 3.5 рази, що підвищує стійкість та стабільність частоти в ЕЕС.

Аналіз отриманих результатів дослідження показав, що обрані параметри накопичувача (табл. 3.1) є оптимальними для розглянутих режимів роботи мікромережі. При паралельному режимі роботи мікромережі робоче тіло переміщується плавно та працює в безпечному діапазоні висот без досягнення критичних меж, що гарантує безперебійне живлення споживачів впродовж усієї доби.

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі досліджено можливість використання гравітаційного накопичувача енергії для балансування активної потужності в мікромережі з великою часткою ВДЕ.

Виконано аналіз головної схеми електричних з'єднань підстанції 110/35/10 кВ «Учбова», розглянуто склад основного електротехнічного обладнання, його технічні характеристики та принципи роботи. Проведено розрахунок струмів короткого замикання та перевірку вибраного обладнання на відповідність умовам експлуатації.

Проведений аналіз сучасного стану розвитку систем накопичення енергії та особливості застосування гравітаційних накопичувачів. Розроблено математичну модель гравітаційного накопичувача енергії, яка враховує взаємодію механічної та електричної підсистем. Отримано залежності, що описують процеси накопичення та віддачі енергії, а також взаємозв'язок між кінематичними та електричними параметрами системи.

Розроблено імітаційну модель мікромережі в середовищі Simulink, до складу якої входять сонячна електростанція, локальне навантаження, зовнішня енергосистема, система керування та гравітаційний накопичувач енергії. Проведено дослідження роботи мікромережі в ізольованому та паралельному режимах. За результатами дослідження встановлено, що гравітаційний накопичувач здатний компенсувати дисбаланс між генерацією та споживанням електроенергії, зменшити вплив коливань потужності сонячної електростанції та підтримувати стабільний режим роботи мікромережі.

Аналіз результатів досліджень роботи розробленої моделі підтвердив її працездатність та доцільність використання ГНЕ для підвищення ефективності функціонування локальних електроенергетичних систем з високою часткою відновлюваних джерел енергії. Запропонована модель мікромережі з ГНЕ може бути використана для подальших досліджень режимів роботи мікромереж, удосконалення алгоритмів керування та оцінки перспектив впровадження гравітаційних накопичувачів енергії в електроенергетичних системах.

					141.EK2110.010.ДБ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

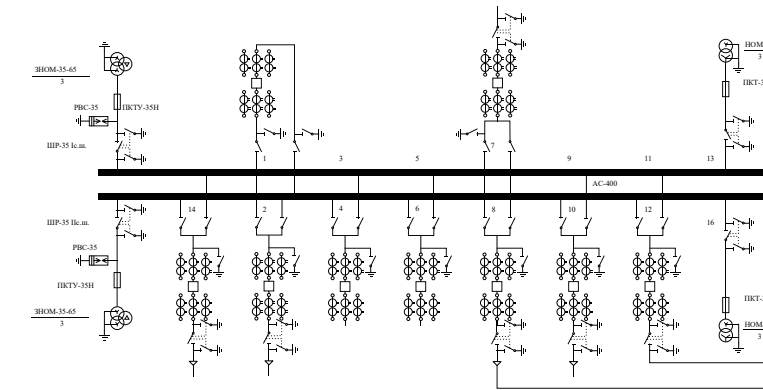
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила улаштування електроустановок. Харків : Форт, 2017. 760 с.
2. Osuagwu C. U. Advanced Grid Management Strategies for Mitigating Stability Challenges in High Renewable Energy Penetration Scenarios. CogNexus. 2025. Vol. 1, Issue 2. P. 119–139.
3. Ali J. S., Qiblawey Y., Alassi A. et al. Power System Stability With High Penetration of Renewable Energy Sources: Challenges, Assessment, and Mitigation Strategies. IEEE Access. 2025. Vol. 13. P. 39912–39934.
4. Brown M., Jarvis A. L. L., Swanson A. G. Comparative Analysis of Lithium-Ion Batteries and Liquid Air Energy Storage Systems for Grid Use. IEEE Access. 2025. Vol. 13. P. 94611–94631.
5. Gunasekara K. K. N. T., Kavindi K. G. H. N., Weerasena M. A. V. P. et al. Renewable Energy Storage: Material Innovations in Batteries and Supercapacitors. Journal of Research Technology & Engineering. 2025. Vol. 6, Issue 4. P. 180–206.
6. Hunt J. D., Zakeri B., Jurasz J. et al. The power of sand: Can solid gravity close the energy storage gap? Journal of Energy Storage. 2025. Vol. 125. Art. 116839.
7. Wang S., Xiao H., Zhao Z. et al. Grid Peak Shaving and Energy Efficiency Improvement: Advances in Gravity Energy Storage Technology and Research on Its Efficient Application. Energies. 2025. Vol. 18. Art. 996.
8. Регулювання частоти та потужності електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії : монографія / О. С. Яндульський, А. Б. Нестерко, О. В. Тимохін, Г. О. Труніна. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 200 с.
9. Abioye R. F., Usiagu G. S., Ihwughwavwe S. I. AI-Based Load Forecasting for Renewable Energy Optimization in Smart Grids. IRE Journals. 2020. Vol. 4, Issue 3. P. 229–247.
10. Taylor A. A Review of Artificial Intelligence for Renewable Energy Management, Prediction and Grid Optimization. World Journal of Advanced Research and Reviews. 2026. Vol. 28, Issue 3. P. 1212–1219.
11. Марчук В. Зелена енергетика 2.0: чого чекати виробникам після закінчення війни. Укрінформ. 2022. URL: [<https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3533739-zelena-energetika-20-cogo-cekati-ii-virobnikam-pisla-zakincenna-vijni.html>] (дата звернення: 30.05.2026).
12. В Україні за два роки побудували понад 660 МВт нових потужностей «зеленої» енергетики. Укрінформ. 2024. URL: [<https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3819280-v-ukraini-za-dva-roki-pobuduvali-ponad-660-mvt-novih-potuznostej-zelenoi-energetiki.html>] (дата звернення: 30.05.2026).

					141.ЕК2110.010.ДБ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

13. Кудря С. О., Зур'ян О. В. Відроджена енергетика — відродження України. Відроджена енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті : матеріали ХХVІ Міжнар. наук.-практ. конф. Київ : Інститут відродженої енергетики НАН України, 2025.
14. Hunt J. D., Zakeri B., Falchetta G. et al. Mountain Gravity Energy Storage: A new solution for closing the gap between existing short- and long-term storage technologies. Energy. 2019. Art. 116419.
15. Chatzigeorgiou N. G., Theocharides S., Makrides G. et al. A review on battery energy storage systems: Applications, developments, and research trends of hybrid installations in the end-user sector. Journal of Energy Storage. 2024. Vol. 86. Art. 111192.
16. Ali M. H., Wu B., Dougal R. A. An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2010. Vol. 1, No. 1. P. 38–47.
17. Pelay U., Luo L., Fan Y. et al. Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 79. P. 82–100.
18. Götz M., Lefebvre J., Mörs F. et al. Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. Renewable Energy. 2016. Vol. 85. P. 1371–1390.
19. IRENA and ILO. Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2021. Abu Dhabi ; Geneva : International Renewable Energy Agency, International Labour Organization, 2021. 98 p.
20. Пушкар М. В. Самозбудження та регулювання в автономних системах генерації з асинхронними генераторами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03. Київ, 2016. 20 с.
21. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 32 с.

ДОДАТОК А

[illegible][illegible]

Инд. апарат	PI-17 N/1 T/1-1946	PI-17 N/2	PI-17 N/2	Япония IAV	PI-251	PI-180N/1 PI-4082	ICB-10	ICB-10	PI-1174	PI-256	PI-59 N/2	PI-32	IC31	Инд. апарат
Нар. апарат	NA-120	ACB-3x150	ACB-2x150		NA-120	NA-120			NA-120	NA-120, NA-120	NA-342x2	NA-342	Нар. апарат	
Лин. пар. апар.	PIB-10000	PIB-10000	PIB-10000		PIB-10000	PIB-10000			PIB-10000	PIB-10000, PIB-10000	PIB-10000	PIB-10000	Лин. пар. апар.	
Омшеница	A-50x5	A-50x5	A-50x6	A-50x6	A-50x10	A-50x10	A-30x4	A-30x4	A-40x4	A-50x5	A-50x5	A-40x4	Омшеница	
Т. д. н. ст. устр.	TI006-10000	TI006-10000	TI006-10000		TI010-10000	TI006-10000	TI017-10		TI010-10000	TI006-10000	TI006-10000	TI006-10000	Т. д. н. ст. устр.	
Масс. машин.	PIB-13-15-10000	PIB-13-15-10000	PIB-13-15-10000		PIB-13-15-10000	PIB-13-15-10000			PIB-10000	PIB-13-15-10000	PIB-10000	PIB-10000	Масс. машин.	
Лин. пар. апар.	A-40x4	A-40x4	A-40x4	A-40x4	A-30x5	A-30x5	A-30x5	A-30x5	A-40x4	A-50x5	A-40x4	A-40x4	Лин. пар. апар.	
Инд. апарат	IC-10	IC-10	IC-11	IC-11	IC-10	IC-10	IC-11	IC-10	IC-11	IC-10	IC-10	IC-11	Инд. апарат	

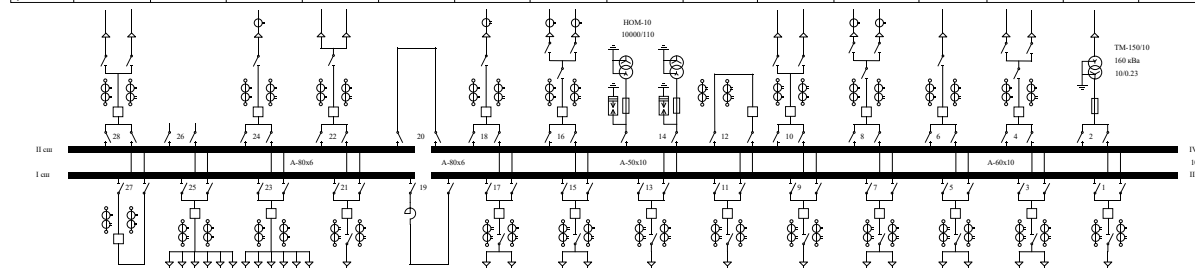
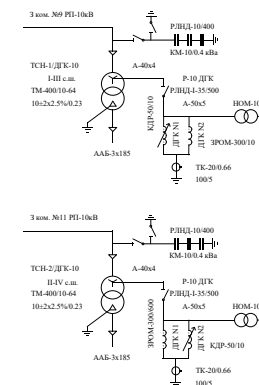
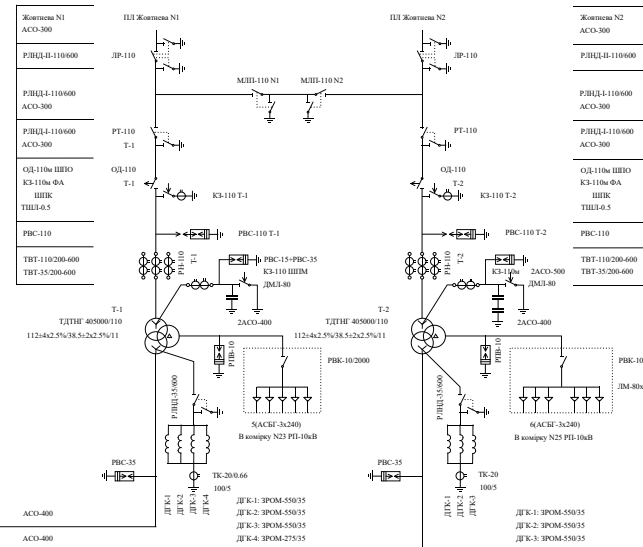
[illegible]

Рисунок А.1 – Схема п/ст 110/35/10 кВ «Учбова»

ДОДАТОК Б

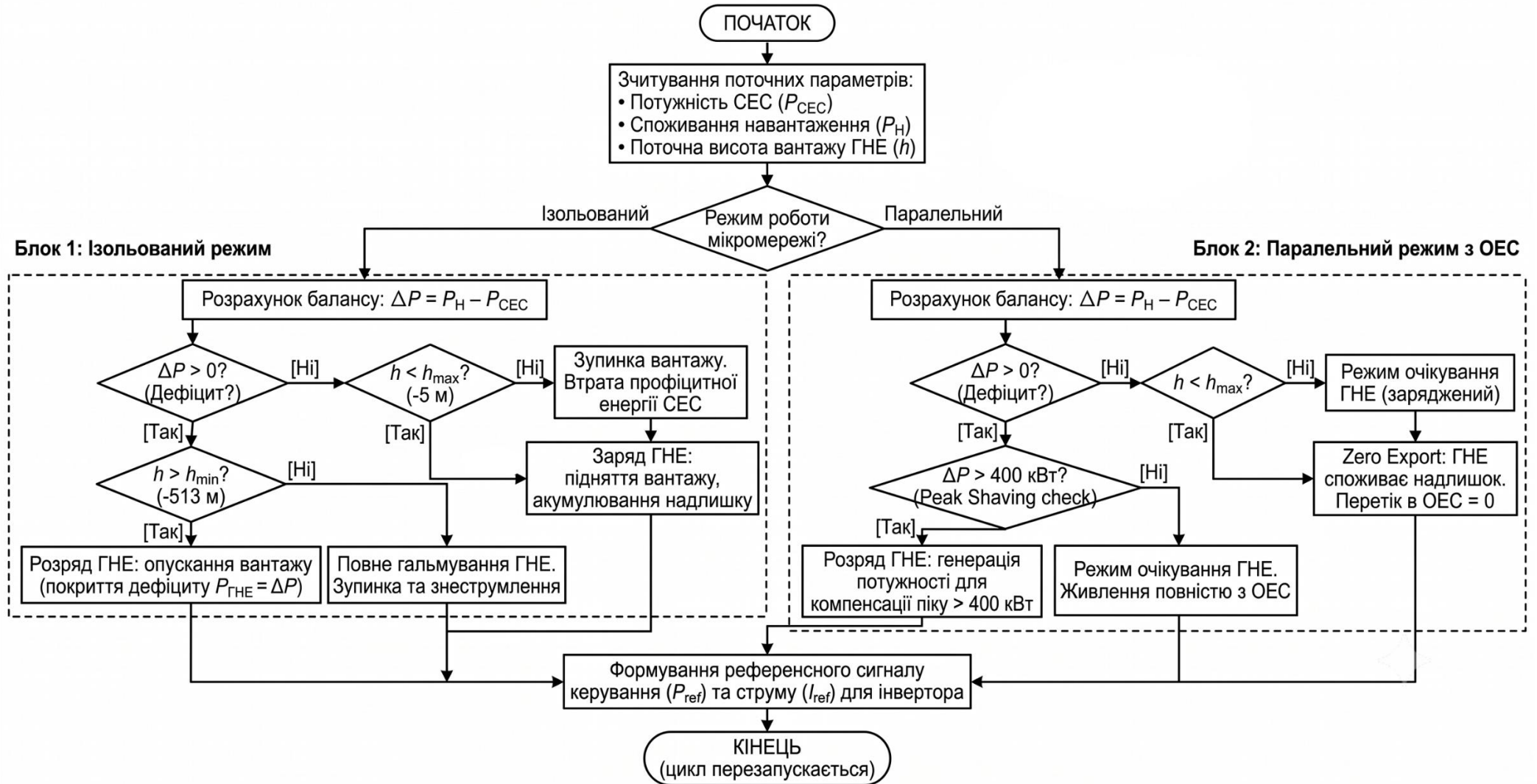


Рисунок Б.1 – Алгоритм керування мікромережею