

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

бакалавр

на тему: «Застосування мережевих накопичувачів електричної енергії у системах електрозабезпечення»

КРБ.141ЕЕбд_31[0].15.00.00.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
спеціальності *141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка*
ступеня вищої освіти *бакалавр*
групи *141ЕЕбд_31[0]*
СОКУР Кирило

Керівник: канд. техн. наук, доцент
БИЧКОВ Ярослав

Полтава – 2026 р

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 4 розділи, 9 рисунків, 3 таблиць, 21 джерело посилання, 50 сторінок.

Об'єкт роботи – системи електрозабезпечення з інтегрованими мережевими накопичувачами електричної енергії.

Предмет роботи – принципи функціонування, режими роботи, технічні характеристики та ефективність застосування мережеских накопичувачів електричної енергії у системах електрозабезпечення.

Постановка актуальної технічної задачі – дослідити можливості застосування мережеских накопичувачів електричної енергії.

Мета кваліфікаційної роботи – дослідження принципів функціонування мережеских накопичувачів електричної енергії та обґрунтування їх ефективного застосування у системах електрозабезпечення для підвищення стійкості, якості та енергоефективності електропостачання.

Практичне значення кваліфікаційної роботи бакалавра – запропоновані підходи можуть бути використані для підвищення стійкості електропостачання, покращення якості електричної енергії, зменшення пікових навантажень на мережу та підвищення ефективності використання відновлюваних джерел енергії.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану розвитку систем накопичення електричної енергії та їх ролі в забезпеченні надійної роботи електроенергетичних систем. Розглянуто основні проблеми функціонування енергосистем, пов'язані з нерівномірністю графіків навантаження, частотними та напруговими відхиленнями, а також питання забезпечення динамічної стійкості електричних мереж. Показано, що використання накопичувачів енергії дозволяє суттєво зменшити вплив аварійних режимів, забезпечити швидке реагування на зміни навантаження та покращити якість електричної енергії. Виконано огляд сучасних технологій накопичення енергії.

У **другому розділі** розглянуто принцип роботи системи накопичення електричної енергії на основі маховика та її взаємодію з електричною мережею через силові електронні перетворювачі. Проведено аналіз конструктивних особливостей низькошвидкісних і високошвидкісних маховиків, їх переваг, недоліків та сфер застосування. Порівняння маховикових накопичувачів з іншими технологіями зберігання електроенергії показало, що їх основними перевагами є

висока швидкодія, значна питома потужність, високий коефіцієнт корисної дії, тривалий термін служби та здатність витримувати велику кількість циклів заряджання-розряджання без суттєвої деградації характеристик.

У **третьому розділі** розглянуто особливості застосування маховикових систем накопичення енергії в сучасних системах електрозабезпечення. Особливу увагу приділено аналізу роботи фотоелектричних систем із маховиковими накопичувачами енергії. Проведений аналіз показав, що маховикові накопичувачі найбільш ефективні для короткочасного зберігання енергії, швидкого заряджання та розряджання, стабілізації режимів роботи електричних мереж і компенсації короткочасних коливань генерації відновлюваних джерел енергії.

У **четвертому розділі** роботи розглянуто основні вимоги охорони праці під час монтажу та експлуатації енергетичних установок, а також порядок надання першої домедичної допомоги при ураженні електричним струмом. Визначено основні принципи надання домедичної допомоги постраждалим від дії електричного струму, що включають швидке усунення небезпечного чинника, оцінювання стану потерпілого та проведення реанімаційних заходів до прибуття медичних працівників.

Практичні результати роботи полягає в узагальненні та систематизації сучасних технічних рішень щодо застосування мережевих накопичувачів електричної енергії в системах електрозабезпечення.

Рекомендації щодо використання результатів роботи – результати можуть бути використані під час проектування та модернізації систем електропостачання промислових, комерційних і побутових споживачів, а також при інтеграції відновлюваних джерел енергії до електричних мереж.

Сфера застосування результатів роботи – відновлювана енергетика.

Ілюстраційна частина проекту становить: 9 аркушів.

Текст пояснювальної записки кваліфікаційної роботи пройшов перевірку на плагіат за допомогою спеціалізованого сервісу "StrikePlagiarism" і є оригінальним. Унікальність тексту становить 78,98 %.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню застосування мережевих накопичувачів електричної енергії у системах електрозабезпечення. У роботі

розглянуто сучасні технології накопичення енергії, їх класифікацію, принципи роботи та технічні характеристики. Проаналізовано можливості інтеграції накопичувачів у електричні мережі для балансування навантаження, компенсації нерівномірності генерації відновлюваних джерел енергії та підвищення надійності електропостачання. Особливу увагу приділено впливу систем накопичення енергії на якість електричної енергії, стійкість електроенергетичних систем і забезпечення резервного живлення відповідальних споживачів. Проведено технічну оцінку застосування мережевих накопичувачів та визначено основні переваги й обмеження їх використання. Результати дослідження підтверджують доцільність впровадження мережевих накопичувачів електричної енергії для підвищення ефективності, гнучкості та надійності сучасних систем електрозабезпечення.

Ключові слова: СИСТЕМА МАХОВИКА, МЕРЕЖЕВИЙ НАКОПИЧУВАЧ, ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, СТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, SMART GRID.

ANNOTATION

The qualification work is devoted to the study of the application of grid energy storage systems in power supply systems. The paper considers modern energy storage technologies, their classification, operating principles, and technical characteristics. The possibilities of integrating energy storage systems into electrical networks for load balancing, compensation of renewable energy generation fluctuations, and improvement of power supply reliability are analyzed.

Special attention is paid to the impact of energy storage systems on power quality, stability of power systems, and backup power supply for critical consumers. A technical and economic assessment of the application of grid energy storage systems is carried out, and the main advantages and limitations of their use are determined.

The research results confirm the feasibility of implementing grid energy storage systems to increase the efficiency, flexibility, and reliability of modern power supply systems.

Keywords: LYWHEEL SYSTEM, NETWORK STORAGE, ELECTRICAL SUPPLY, POWER QUALITY, SUSTAINABILITY OF ELECTRICAL SUPPLY, SMART GRID.

ЗМІСТ

ВСТУП		7
1	АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	9
1.1.	Динамічна стійкість електричних систем	13
1.2.	Існуючі методи та інструменти для забезпечення стійкості	15
1.3.	Усунення збурень у системі за допомогою пристроїв зберігання	18
	Висновок до розділу 1	24
2	СИСТЕМА МАХОВИКА ТА КОНФІГУРАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	25
2.1.	Системи зберігання енергії на маховиках	26
2.2.	Характеристики маховика	30
	Висновок до розділу 2	
	ЗАСТОСУВАННЯ МАХОВИКІВ	32
3.1	Аналіз потоку потужності у фотоелектричних системах з маховиком	35
3.2	Будова та стратегія системи	37
	Висновок до розділу 3	
4	ОХОРОНА ПРАЦІ	40
4.1	Заходи безпеки під час монтажу енергетичних установок	40
4.2	Перша домедична допомога при ураженні електричним струмом	42
	Висновок до розділу 4	44
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	45
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	48

КРБ.141ЕЕбд_31[1].15.00.00.000 ПЗ				
ЗМ.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.		Сокур К.О.		
Перевір.		Бичков Я.М.		
Н.контр.		Бичков Я.М.		
Затв.		Попов С.В.		
Зміст				
		Літ.	Аркуш	Аркушів
		н	6	50
ПДАУ 2026				
6				

ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку електроенергетичних систем часто пов'язані з широким впровадженням новітніх технологій, особливо генерації з використанням відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі, вітрогенератори тощо. Завдяки автоматизованим системам управління змінним струмом стало можливим ввести в експлуатацію нові генеруючі потужності та зменшити негативний вплив електроенергетичної промисловості на екологічне середовище.

Новітні пристрої накопичення та зберігання енергії відрізняються найважливішим параметром – таким як здатність миттєво змінювати споживання енергії або віддавати потужність. Таким чином, при використанні систем із накопичувальними пристроями спостерігається значне зростання електродинамічної стійкості.

Сучасні технології зберігання енергії значно спрощують встановлення відновлюваних джерел енергії з великою потужністю для забезпечення електроенергією споживачів, коли основні джерела не можуть цього зробити внаслідок атак агресора на енергетичні комунікації чи з інших причин.

Відомо, що вітрова енергія виробляється лише тоді, коли дмуть вітри, а сонячна енергія фактично перетворюється на електричну, коли світить сонце, що в кінцевому підсумку в період низької активності призводить до невідповідності попиту і пропозиції. Виходячи з наведеного вище, отримання електроенергії слід планувати заздалегідь, а використовувати у певні години.

Завдяки новим технологіям зберігання енергії можливо виробляти енергію на низьких потужностях, а також продавати надлишки в періоди максимальних потужностей. При використанні електроенергії з відновлюваних джерел, яка зберігається у накопичувачах, суттєво зменшуються викиди парникових газів в атмосферу.

У накопиченні енергії існує кілька методів, таких як довготривале зберігання енергії і з швидким використанням. Деякі технологічні методи більше зорієнтовані на вирівнювання коротких сплесків електроенергії для процесів, які забезпечують

					КРБ.141ЕЕ60_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

її якість, наприклад, згладжуючи генерацію відновлюваних джерел енергії з години в годину.

Мета кваліфікаційної роботи – дослідження принципів функціонування мережевих накопичувачів електричної енергії та обґрунтування їх ефективного застосування у системах електрозабезпечення для підвищення стійкості, якості та енергоефективності електропостачання.

Об'єкт роботи – системи електрозабезпечення з інтегрованими мережевими накопичувачами електричної енергії.

Предмет роботи – принципи функціонування, режими роботи, технічні характеристики та ефективність застосування мережевих накопичувачів електричної енергії у системах електрозабезпечення.

Постановка актуальної технічної задачі:

- проаналізувати сучасний стан розвитку систем накопичення електричної енергії;
 - розглянути класифікацію, принципи роботи та технічні характеристики мережевих накопичувачів;
 - дослідити можливості інтеграції накопичувачів енергії в системи електрозабезпечення;
 - оцінити вплив накопичувачів на надійність, якість електроенергії та балансування навантаження;
 - визначити типові конфігурації систем маховиків;
 - провести аналіз потоку потужності у фотоелектричних системах з маховиком;
- визначити основні переваги, обмеження та перспективи використання систем накопичення енергії в електроенергетиці.

										КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							8

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Виробництво електроенергії в Україні у 2026 році базується на атомній генерації (понад 50%) та відновлюваних джерелах, проте фокус зміщено на розбудову розподіленої генерації для захисту від обстрілів. Уряд запроваджує масштабні стимули для нових потужностей у регіонах, включно з Полтавщиною [1]. Через значні втрати теплових (ТЕС/ТЕЦ) та гідроелектростанцій (ГЕС) від масованих ударів, балансувати енергосистему допомагають сонячні (СЕС), вітрові (ВЕС) електростанції, імпорту з ЄС та розподілена генерація [2-5].

Найпоширенішою проблемою є низька маневреність або зниження відгуку обладнання, яку можна вирішити досить просто за допомогою ESS, такий синтез може виробляти енергію у пікові моменти, коли є помітний дефіцит, а також має накопичення енергії при низькому навантаженні [6, 7]. Окрім усього цього, є ще один відчутний плюс — це можливість компенсувати реактивну потужність можливістю регулювати частоту, весь цей комплекс з ESS може використовуватися разом із генеруючими установками. Вирішення проблем з перепадами напруги або відключеннями світла у Полтаві дійсно просто реалізувати за допомогою ESS (Energy Storage System) — системи накопичення енергії. Це не просто акумулятор, а розумний комплекс, який забезпечує ваш дім чи офіс безперебійним живленням.

Накопичення: система заряджається від центральної мережі у години, коли є електрика, або від домашньої сонячної електростанції. **Живлення:** при відключенні світла система миттєво (за мілісекунди) перемикає живлення на акумулятори, забезпечуючи безперебійну роботу побутової техніки. **Економія:** дозволяє накопичувати енергію за дешевшим нічним тарифом та використовувати її вдень, знижуючи витрати на електроенергію.

З іноземного досвіду, наприклад, у США з їхнім внутрішнім енергетичним ринком, щодо можливості регулювання частоти в системі об'єктів, серед іншого, існує перспектива, що, окрім оплати, усім учасникам такого енергетичного ринку надається хороша можливість самостійно керувати навантаженням, що є важливим

					КРБ.141EE6d_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

у сучасних реаліях.

Серед найбільш проблемних або значущих завдань, рішення яких можна усунути або суттєво підвищити ефективність за допомогою ESS, існують переважно два найважливіші типи завдань:

- ESS використовується як додаткове або допоміжне обладнання для таких об'єктів, як генерація з одночасним перерозподілом функціональності за маневреністю різних генераційних об'єктів ESS;
- безпеки та підвищення ефективності експлуатації обладнання, а також розширення різних функцій, що в кінцевому підсумку забезпечує значне підвищення якості електроенергії.

Що входить до завдань об'єктів ESS:

— По-перше, це здатність забезпечити правильну роботу різних об'єктів, де генерація здійснюється в таких режимах, як регулювання частоти, зокрема в режимах Загального первинного регулювання частоти та Нормованого первинного регулювання частоти.

— Можливість виконання різних видів команд для зменшення або збільшення різних потужностей, а також роботи в безпечних режимах заміни різних реакторних установок.

— Підтримка навантаження у постійному та незмінному режимі під час роботи обладнання АЕС (номінальний режим роботи), крім того, це призводить до зменшення різних збурень у електромережі.

— Здатність підвищувати значні високі показники КВВП (Коефіцієнт використання встановленої потужності збільшуючи різні типи споживання електроенергії) і все це під час роботи, атомна електростанція, яка має здатність контролювати щоденний графік електричних навантажень і, зокрема, регулювати частоту.

— Різні уповільнення зносу встановленого обладнання на АЕС з метою уникнення додаткових відчутних витрат разом із позитивним економічним ефектом від терміну служби, у таких режимах експлуатації, як змінне навантаження, зниження витрат і збільшення часового інтервалу ремонтних робіт,

					КРБ.141EE6d_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Одноденний профіль навантаження системи зберігання електроенергії
(Рисунок 1.1):

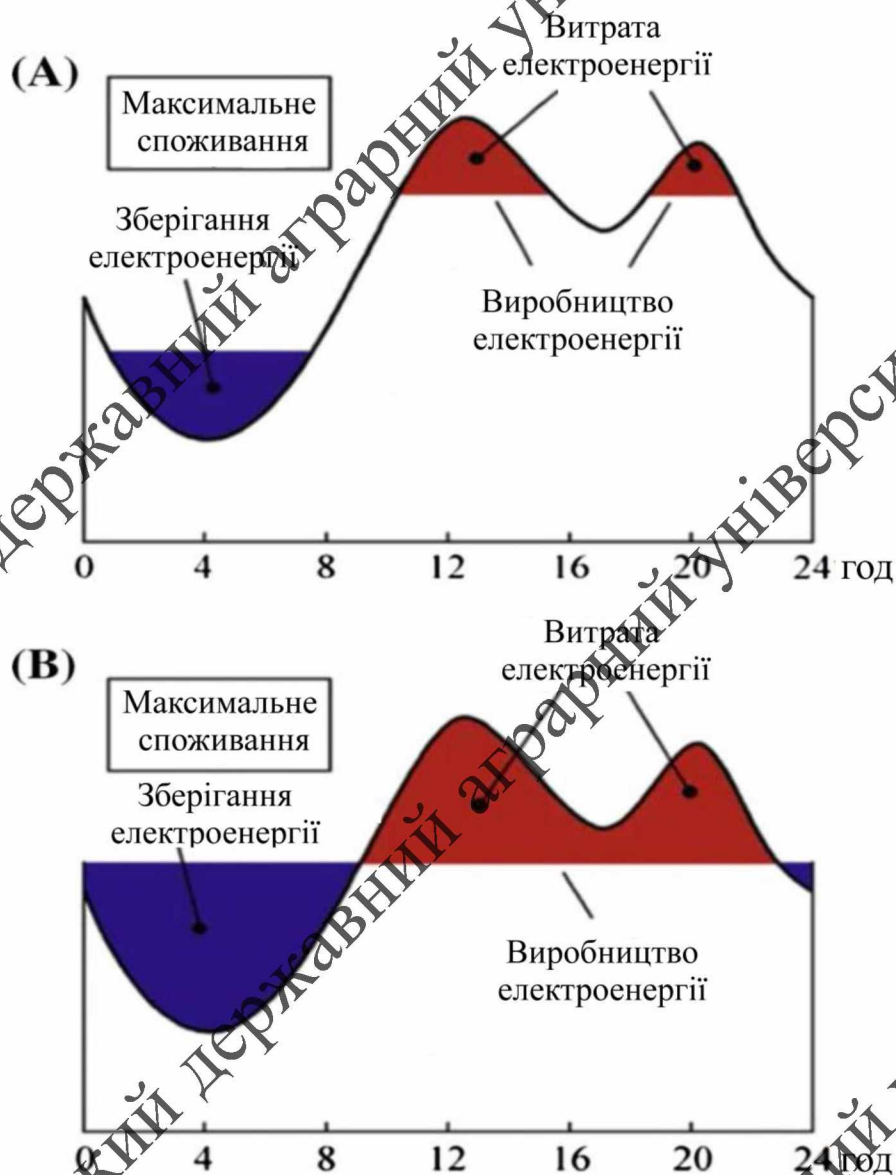


Рисунок 1.1 – Профіль одноденного навантаження системи зберігання електроенергії.

Для забезпечення номінального режиму роботи таких об'єктів, як генерація, без втрати виробництва електроенергії, допоможе метод самостійного маневрування Battery Energy Storage Systems (BESS) — це найбільш ефективний спосіб підтримки стабільної генерації без втрати вироблення, особливо в умовах інтеграції нестабільних відновлюваних джерел, який зможе накопичувати і

					КРБ.141EE6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ		Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			12

віддавати електроенергію, якої бракуватиме в пікові періоди. Щоб економічний ефект був максимально прибутковим, достатньо впровадити групи заходів на діючих і майбутніх АЕС, концентрація яких була б спрямована на нові характеристики та функціонування комплексу ESS-АЕС, спрямовані на регулювання частотних порушень.

Наразі все ще важко вирішити питання економічної ефективності та впровадження ESS, але це не скасовує низку позитивних і значущих ефектів, таких як підвищення ефективності та покращення якості виробленої електроенергії.

1.1 Динамічна стійкість електричних систем

Як відомо, динамічна стійкість характеризується здатністю системи відновлюватися після серйозного збурення або аварії до майже близького до початкового.

Також важливо зазначити, що стійкість системи характеризується синхронною паралельною роботою генераторів. Динамічна стійкість забезпечується збереженням живлення, що подається до мережі, у разі серйозних або непередбачених порушень передачі електроенергії. Головне і найсерйозніше порушення – коротке замикання синхронного генератора.

Транзитні процеси, що відбуваються під час значної зміни в енергосистемі, можна описати шляхом вираження руху ротора генератора [9-10].

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_G = \Delta M \quad (1)$$

де M_T — крутний момент на валу двигуна;

M_G — так званий момент опору на валу генератора;

ω — кутова швидкість вала;

J — загальний момент інерції генератора і двигуна;

ΔM — це дисбаланс моментів.

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Формулу (1), описану вище, можна назвати рівнянням динамічної рівноваги, оскільки при рівних моментах кутова частота обертання ротора генератора не змінюється.

Згідно з формулою (2), ми можемо знайти електромагнітний момент

$$M_{\Gamma} = \frac{mUE_q}{\omega_1 X_d} \sin(\theta) + \frac{mU^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\theta), \quad (2)$$

де m — кількість полюсів статора генератора;

U — це напруга на шинах генератора;

E_q — ЕРС генератора;

ω_1 — це кутова швидкість генератора;

X_q, X_d — це опори вздовж поздовжньої та поперечної осей синхронної машини;

θ — це кут навантаження генератора.

Важливо підкреслити, що значення електромагнітного моменту синхронного генератора, як правило, у чисельному еквіваленті можна визначати енергією, яка, у свою чергу, розсіюється активним опором обмотки статора та зовнішнім опором схеми, іншими словами, можна сказати, що активна функція струму статора – це крутний момент.

З наведеного вище виразу (2) випливає, що він справджується для явнополюсного синхронного генератора; нижче у формулюванні розглянемо неявнополюсний синхронний генератор, але не просто генератор, а той, що має однакові індуктивні опори вздовж поздовжньої та поперечної осей.

$$M_{\Gamma} = \frac{mUE_q}{\omega_1 X_d} \sin(\theta), \quad (3)$$

де m — кількість полюсів;

U — це напруга на шинах генератора;

E_q — ЕРС генератора;

ω_1 — це кутова швидкість генератора;

X_q, X_d — опори вздовж поздовжньої та поперечної осей синхронної машини;

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

θ — це кут навантаження генератора.

Тепер розглянемо зміну електромагнітної величини, спричинену проявом раптового короткого замикання генератора.

Отже, відомо, що у випадку короткого замикання струм стартера також має тенденцію змінюватися, під навантаженням характеристичний коефіцієнт потужності становить 0,8... 0,9, можна також сказати, що активна частина струму статора здебільшого проявляється, але якщо говорити про режим короткого замикання, то залежно від місця виникнення короткого замикання, його опору та типу, то можна з упевненістю сказати, що активна складова опору падає до нуля.

Слід також враховувати, що напруга на шинах генератора зменшується під час короткого замикання, а електромагнітний момент у залежності також зменшується.

З наведеного вище можна зазначити, що зменшення електромагнітного моменту можна охарактеризувати коротким замиканням. Через те, що крутний момент турбіни не змінюється, відбувається порушення балансів відповідно до формули 1, що незабаром призведе до порушень режиму швидкості генератора і він просто вийде з синхронної швидкості.

Коли завантажений генератор раптово відключається від мережі, його гальмівний електромагнітний крутний момент зникає, і крутний момент турбіни через інерцію клапанів і наявність об'ємів пари і газу в парових і газових турбінах або через небезпеку гідравлічного удару у водяних трубах гідротурбін, стає надмірним, що призводить до неминучого збільшення швидкості обертання агрегату. У цьому випадку падіння швидкості залежить від початкового навантаження, конструктивних особливостей агрегату та характеристик керування турбіною.

1.2 Існуючі методи та інструменти для забезпечення стійкості

Наразі головне завдання підтримання стабільної енергетичної системи повністю зосереджено на автоматизації, що, у свою чергу, передбачає надійну

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

конструкції стартовий елемент має здатність контролювати або зменшувати активну потужність із можливістю генерувати відповідний сигнал згідно з яким він працюватиме – довгий або короткий – після чого створений певний сигнал подається в автоматичний блок керування (АБК), механізм керування якого базується на даних таблиць дозування (ТД), завдяки чому можна діяти на тривалість роботи клапанів турбіни.

Схема АЗПС [10], що використовується для запобігання динамічним відмовах стійкості (Рисунок 1.2):

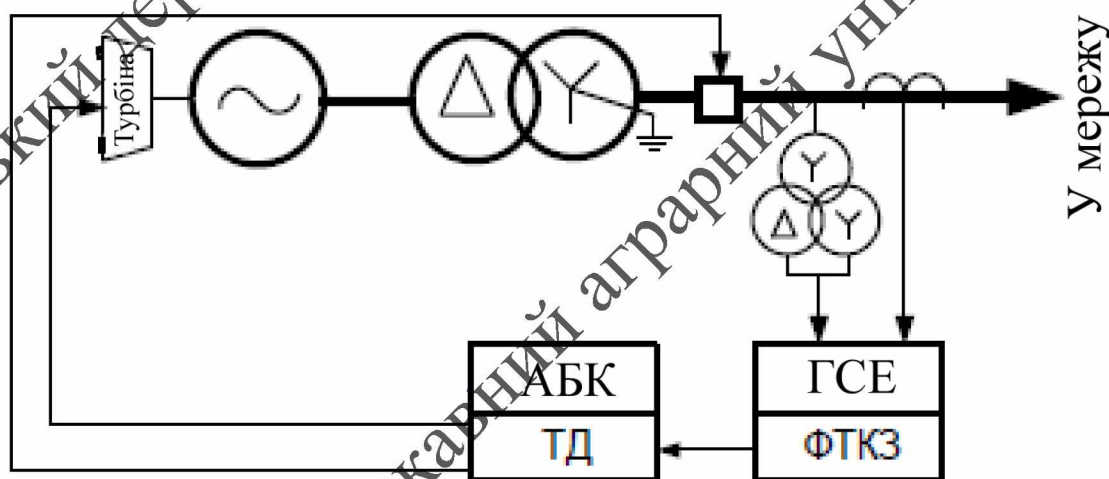


Рисунок 1.2. Схема АЗПС, що використовується для запобігання динамічним відмовах стійкості

У разі надзвичайної ситуації, яка, у свою чергу, спричиняє надлишкову кінетичну енергію турбіни, необхідно вжити заходів для її уникнення шляхом короткострокового зупинки або, іншими словами, розвантаження турбіни шляхом зменшення її крутного моменту, що здебільшого застосовується лише до теплових турбін. Але існує небезпека у вигляді коливань, спричинених різким зниженням амплітуди через сильне зворотне розвантаження. Крім того, існує ризик надмірного гальмування, що означає вихід із стійкості.

Вимикання генераторів.

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Часто генератори вимикають для підтримки стабільності системи, і вони мають два основні параметри, такі як зменшення дисбалансу в енергетичній системі або зниження інерції (ΔM) відповідно до формули (1).

Основні проблеми, що виникають при вимкненні генератора:

- збільшення навантаження під час зупинки, що, у свою чергу, впливає на термін служби гідрогенератора.
- перезапуск можливий лише через певний час, щоб дати йому охолонути, тоді як простій негативно впливає на економічні показники.

1.3. Усунення збурень у системі за допомогою пристроїв зберігання

Потреба в енергії не залишається на одному рівні протягом доби і протягом року. Таким чином, пікові та позапікові потреби виникають протягом дня та сезонів через індивідуальні потреби та кліматичні впливи. Ці явища вимагають накопичення енергії.

Головне завдання – підтримувати динамічну стійкість системи відповідно до основних критеріїв, таких як джерело живлення, у найкоротший проміжок часу, що може призвести до головного недоліку – підвищенню небалансу.

Пристрої для зберігання енергії класифікуються за швидкістю реакції, ємністю та призначенням – від короткочасної стабілізації мережі до тривалого резервування. Нижче наведено ключові характеристики продуктивності основних типів накопичувачів згідно з галузевими IEEE та інженерними стандартами: [11,12, 13]

Електромагнітні та електростатичні пристрої

1. Суперконденсатори (Supercapacitors):

1.1. Характеристика: Накопичують електростатичний заряд. Забезпечують найвищу питому потужність, миттєву реакцію та мільйони циклів заряду-розряду без деградації. Мають дуже низьку енергетичну щільність.

1.2. ККД: 85–95%.

2. SMES (Надпровідні магнітні накопичувачі енергії):

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

2.1.1. Характеристика: Зберігають енергію у магнітному полі надпровідної котушки. Мають блискавичний час відгуку (<10 мс) та ефективність до 98%. Використовуються для компенсації провалів напруги.

2.1.2. ККД : 85–98%. [11,12, 13]

3. Механічні накопичувачі

3.1. FES (Акумулятори на маховику / Flywheels):

3.2. Характеристика: Зберігають енергію у вигляді кінетичної енергії обертового ротора. Видають високу потужність, швидко реагують (до 20 мс) і служать понад 20 років.

3.3. ККД: 90–95%

4. PHS (Гідроакумулюючі електростанції / Pumped Hydro):

4.1. Характеристика: Перекачують воду у верхній резервуар. Забезпечують до 96% світової глобальної ємності накопичення, ідеальні для масового зберігання, але потребують специфічного ландшафту.

4.2. ККД: 70–85%.

5. CAES (Зберігання енергії стисненого повітря):

5.1. Характеристика: Нагнітають стиснене повітря у підземні сховища. Велика потужність, але низька енергоефективність через втрати тепла при стисненні.

5.2. ККД: 40–55% (звичайні) до ~70% (удосконалені).

5.3. Електрохімічні системи

6. Потоккові акумулятори (Flow Batteries):

6.1. Характеристика: Енергія зберігається в рідких електролітах. Мають необмежений термін служби електроліту (до 25+ років) та чудово підходять для довготривалого циклування, проте мають низьку щільність.

6.2. ККД: 75–85%.

Теплові та комплексні системи

7. TES (Теплове зберігання / Thermal Energy Storage):

7.1. Характеристика: Акумулюють тепло або холод (наприклад, у розплавах солей чи воді) для подальшого використання чи вироблення електроенергії.

					КРБ.141EE6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Дешеві для масштабного впровадження, але мають великі втрати при саморозряді.

7.2.ККД: 30–60%.

8. HES (Гібридне зберігання / Hybrid Energy Storage):

8.1. Характеристика: Комбінація двох і більше накопичувачів (наприклад, Li-ion акумулятори + суперконденсатори). Поєднують переваги обох технологій (високу ємність і високу потужність) для згладжування піків навантаження.

8.2.ККД: Змінний (залежить від комбінації технологій)

Нижче (Рисунок 1.3) [14] ми представимо класифікацію різних пристроїв для зберігання енергії. Пристрої зберігання енергії можуть забезпечити гнучке виробництво та постачання стабільної електроенергії для задоволення потреб споживачів.

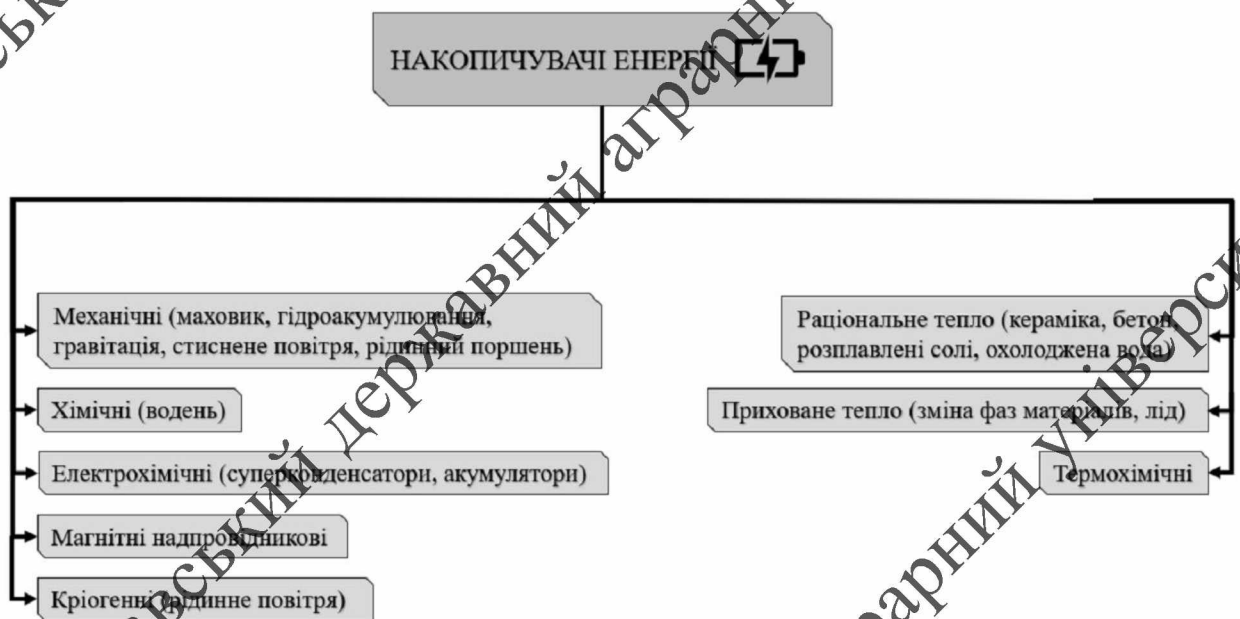


Рисунок 1. 3 - Характеристики продуктивності різних пристроїв зберігання енергії [14]

Роль маховикових акумуляторів у сучасному енергетичному секторі.

Пристрої зберігання енергії для маховика FES складаються з різних типів маховиків (масивних або композитних), мотор-генератора та магнітних скоб, встановлених всередині корпусу. Вони мають дуже високу циклічну потужність із значеннями циклів від 10 000 до 100 000. Електричні енергетичні системи

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

потребують потужних маховиків з меншими втратами тертя на осях (маховик 200 кВт вагою 200 тон). Ефективність залежить від часу зберігання енергії, наприклад, середня ефективність 85% може знизитися до 78% і 45% відповідно через 5 годин і 24 години (повний день). Відповідно, маховики неефективні для довготривалого зберігання електроенергії, але їх можна використовувати у поєднанні з іншими пристроями. FES виготовлений із вуглецевого волокна і може бути низькошвидкісним ($6 \cdot 10^3$ об/хв) або високошвидкісним (10^5 об/хв). Однак високошвидкісний FES має великі витрати.

Системи маховиків зазвичай працюють у високому вакуумі та мають наступні характеристики:

- незначні втрати тертя,
- невеликий пневматичний опір,
- тривалий термін служби,
- відсутність шкідливого впливу на довкілля
- незначне технічне обслуговування.

FES може допомогти контролювати частоту енергосистеми та забезпечувати якість доставленої електроенергії. Він переважно використовується у виробництві відновлюваної енергії, де коливання електроенергії є високими та частими. Наразі його основне призначення – доповнення акумуляторної системи. Переваги FES численні – висока потужність і енергетична щільність, тривалий термін служби та менше періодичного обслуговування, короткий час підзарядки, відсутність чутливості до температури, ефективність 85-90%, надійність, висока швидкість заряджання та розряду, відсутність деградації енергії під час зберігання. Основні недоліки та обмеження можуть бути: низька питома енергія, короткий час розряду, складність конструкції, механічне навантаження, питання безпеки через високу швидкість ротора та можливість поломки, а також висока вартість. Маховики менш розвинута технологія порівняно з акумуляторами, а поточна вартість надто висока, що робить їх неконкурентоспроможними на ринку. Однак вартість системи можна знизити, використовуючи малопотужні маховики.

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Схема джерела зберігання енергії системи маховика (рисунок 1.4):

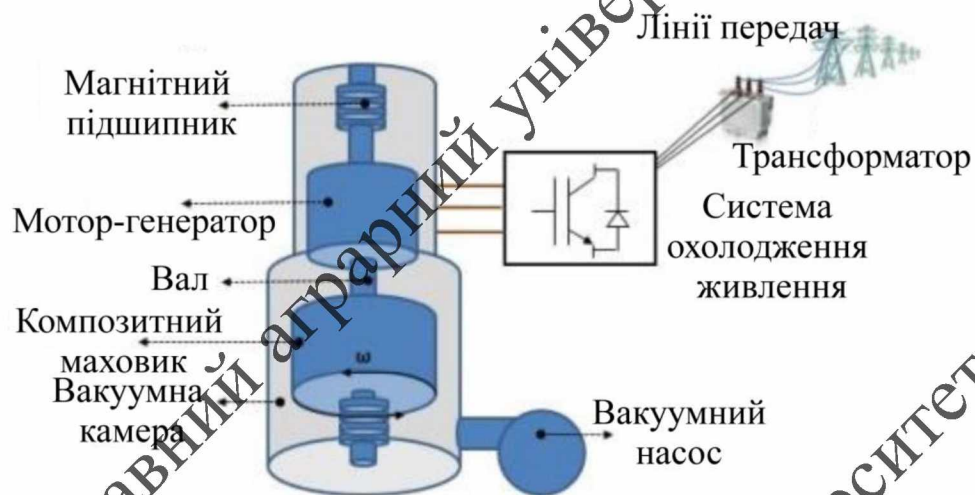


Рисунок 1.4 - Схема джерела зберігання енергії системи маховика

Важливу роль у сучасній енергетичній сфері відіграє система надпровідного індуктивного накопичення енергії (SMES).

У центрі такої електромережі лежить те, що колись називали динамо — генератор, що складається зі стосів міді, які обертаються в електромагнітному полі.

Це механічне обертання, у свою чергу, обертає мідні трубки в магнітному полі. Це індукує струм у міді, який потім проходить через сучасну електромережу.

Спінові струми, тобто потік кутового моменту без одночасної передачі електричного заряду відіграє ключову роль у сучасних дослідженнях спітроніки.

Наприклад, їх можна використовувати для керування магнітною динамікою, перемикання магнітних моментів і спрощення використання спітроніки для збору енергії.

Генерація спінових струмів була ґрунтовно вивчена за останнє десятиліття. За допомогою ефекту Холла з оберненим спіном струми заряду можна перетворити у спіновий струм, що тече перпендикулярно до орієнтації потоку заряду, і було досліджено широкий спектр тонкоплівкових металів і напівпровідникових матеріалів для ефективного генерування та виявлення спінових струмів через Spin Hall Effect (SHE).

Ще одним широко використовуваним методом генерації спінових струмів є спінове накачування за допомогою магнітної динаміки. Коли магнітна динаміка контролюється мікрохвильовим (МХ) поглиненням феромагнітного матеріалу (ФМ), нерівноважні спінові хвилі накопичуються і

						КРБ.141EE60_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			22

розсіюються з фіксованою швидкістю. Один із механізмів розсіювання у ферромагнітному/немагнітному подвійному шарі полягає у передачі кутового моменту на спіни електронів у немагнітному шарі, де генеруються спінові струми. Спінові струми потім перетворюються на струми заряду за допомогою ISHE, як показано на рисунку 1.5(a) [15]. Матеріали з високою спіноюю орбітою, такі як Pt, часто використовуються як якісні матеріали SHE для ефективного виявлення спінового потоку. Хоча це схема збудження електричним зарядом і струмом, зазвичай використовується схема вимірювань спінового накачування, заснована на розімкненому ланцюзі, де електричні напруги вимірюються і розглядаються як ознаки спінового накачування.

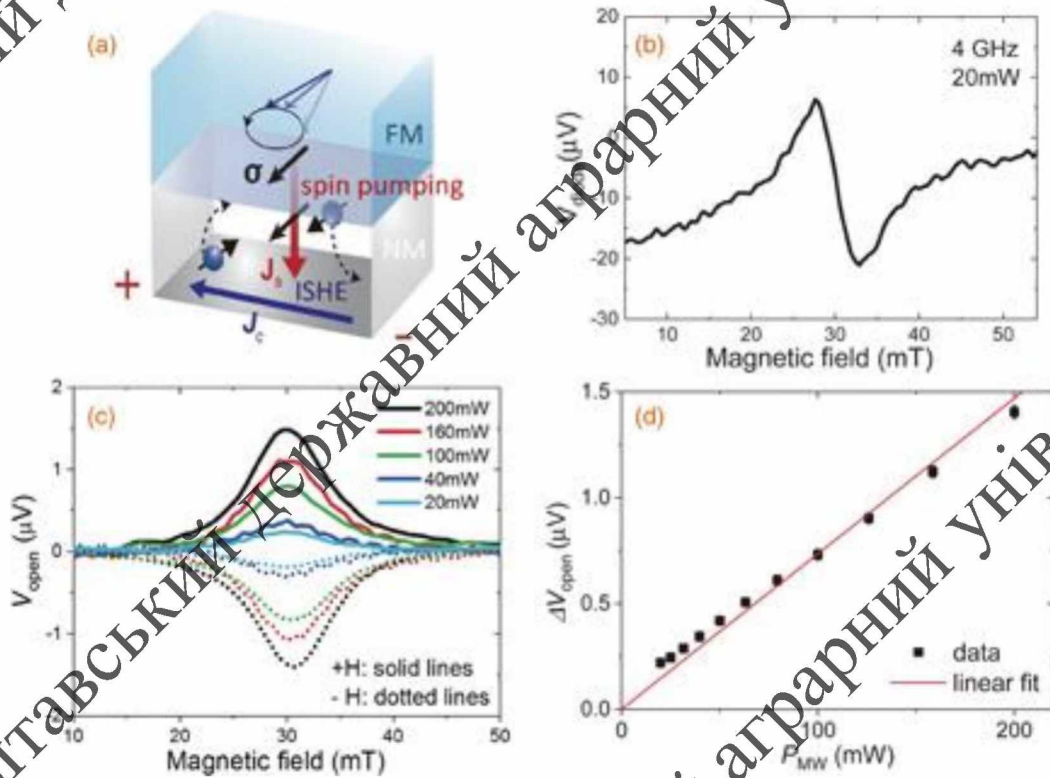


Рисунок 1.5 - Схема спін-накачування.

Для добування електричної енергії зі спінової накачки використовується резистор змінного навантаження для закриття розімкненого ланцюга. Це дозволило струмам накачування насоса в зразку рухатися у замкненому колі. Таким чином, у резисторі навантаження виникла скінченна потужність розсіювання, яку можна виміряти за падінням напруги на резисторі навантаження.

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Висновок до розділу 1

Основний спосіб протидії аварійним ситуаціям та стійкості енергосистеми – реагування за допомогою пристроїв зберігання енергії.

Вибір кількох груп пристроїв зберігання та їх подальше поєднання між собою для усунення збуджень у енергосистемах.

Керування групами накопичувачів за допомогою різних алгоритмів.

Завдяки накопиченню енергії можливо розв'язувати проблеми динамічної стабільності енергетичних систем без додаткових і тривалих зупинок групи генераторів та комутацій.

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

2 СИСТЕМА МАХОВИКА ТА КОНФІГУРАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Основна схема складається з системи зберігання енергії, електронного інтерфейсу з LCL-фільтром та трифазного джерела, що представляє електричну мережу, як показано на рисунку 2.1.

Система зберігання енергії у цьому випадку являє собою маховик, підключений до індукційної машини. Для перетворення енергії використовується індукційна машина. Силова електроніка складається з двох перетворювачів напруги, з'єднаних через спільне з'єднання. Один перетворювач джерела напруги взаємодіє з перетворювачем енергії та системою зберігання іншого через систему електромережі.

Система зберігання енергії маховика має три режими роботи:

- Режим заряджання.
- Режим очікування.
- Режим розряду.

У режимі заряду перетворювач, що взаємодіє з системою енергомережі, працює як випрямляч, а інший – як інвертор, при цьому енергія передається, прискорюючи маховик до номінальної швидкості. У цьому режимі енергія зберігається у маховику у вигляді кінетичної енергії.

Потік енергії йде від мережі до маховика з індукційною машиною у якості енергії перетворювача.

Коли маховик досягає швидкості заряду, резервна система зберігання готова до розрядки при падінні напруги на шині РСС. Падіння напруги на шині РСС (Point of Common Coupling - Точка загального приєднання) зазвичай спостерігається в таких основних випадках.

Пуск потужних споживачів: Прямий пуск асинхронних двигунів або увімкнення енергоємного обладнання викликає різкий стрибок реактивного струму, що призводить до короткочасного падіння напруги у всій мережі.

Короткі замикання (КЗ): Будь-яке аварійне зниження опору в електричному

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

ланцюзі (особливо міжфазні або трифазні КЗ), викликає глибоке просідання напруги в точці загального приєднання.

Нестача реактивної потужності: Виникає в моменти пікових навантажень, якщо локальні генератори або компенсатори не встигають видати необхідний обсяг реактивної енергії.

У режимі розряду перетворювач, що взаємодіє з енергосистемою, працює як інвертор, а потрібна напруга подається послідовно з лінією для усунення падіння напруги.

Маховик працює як випрямляч. Маховик сповільнюється під час розряду. У цьому режимі накопичена енергія використовується для корекції «просідання», і потік енергії переходить від маховика до системи (Рисунок 2.1):

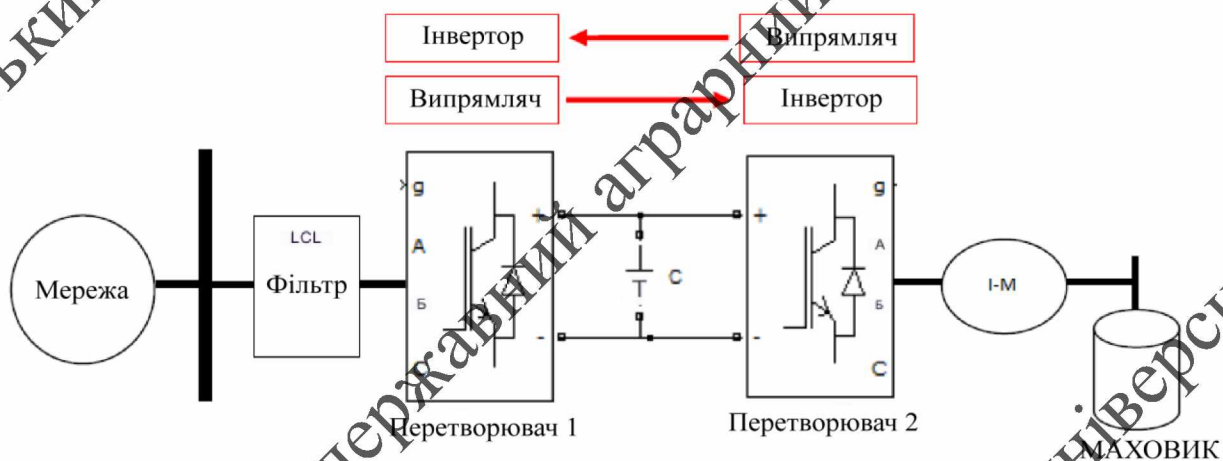


Рисунок 2.1 Принципова схема зберігання енергії системою маховика

Система зберігання енергії маховика складається з таких компонентів:

- Два перетворювачі напруги
- Індукційна машина
- Маховик
- Система керування

2.1 Системи зберігання енергії на маховиках

Маховик зберігає кінетичну енергію у обертівій масі. Енергія пропорційна

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

інерції J тіла та квадрату кутової швидкості обертання Ω^2 .

$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \Omega^2 \quad (4)$$

Основні компоненти системи зберігання енергії з маховиком можна побачити на (Рисунок 2.2). Для перетворення енергії потрібна електрична машина. Це прискорює ротор при зарядженні маховика, перетворюючи електричну енергію на механічну. Під час розрядки машина працює як генератор, гальмуючи ротором і повертаючи енергію в мережу. Джерело живлення та зворотний зв'язок здійснюються за допомогою інвертора живлення, який забезпечує двонаправлений потік енергії. Підтримка ротора маховика може бути реалізована як механічними, так і магнітними, залежно від робочої швидкості. Маховики можна поділити на високошвидкісні (10000... 100000 хв) і на низькі швидкості (менше 6000 хв). Високошвидкісні маховики зазвичай мають магнітну левітацію і працюють у вакуумі або частковому вакуумі, щоб зменшити втрати від тертя. Тому в системі потрібен вакуумний насос і магнітний підшипник. Характеристики маховиків на низьких та високих швидкостях порівняно у Таблиці 2.1.

Основні компоненти системи зберігання енергії маховика (Рисунок 2.2):



Рисунок 2.2 - Компоненти маховика: [15]

						КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			27

Таблиця 2.1 - Характеристики маховиків на низьких та високих швидкостях

-	Низькошвидкісні маховики	Високошвидкісні маховики
Матеріал ротора	Сталь	Композитні матеріали
Електрична машина	Асинхронна машина, котушкова машина для збудження на котушці, машина з постійними магнітами, реактивна машина	Машина з постійними магнітами, реактивна машина
Інтеграція електронної машини та маховика	Відсутність інтеграції або часткова інтеграція	Повне або часткове інтегрування
Підшипники	Механічні або змішані (механічні та магнітні)	Магнітні
Закрита атмосфера	Низький вакуум або легкий газ	Високий або середній вакуум
Основне застосування	Якість живлення	Силове електрозабезпечення

Низькошвидкісні маховики зазвичай мають високу енергетичну здатність (1... 10·X кВт·год) і високу номінальну потужність (у МВт). Одним із типових застосувань є енергомережа для стабілізації частоти та напруги. Ротор виготовлений зі сталі, що знижує трудомісткість і вартість порівняно з композитними матеріалами, армованими волокном. Через низьку швидкість потрібна велика інерція маси ротора, що призводить до збільшення ваги та розмірів системи. Але це не критичні питання для стаціонарних застосувань. Низька швидкість також дозволяє використовувати механічні підшипники. Для збільшення терміну служби підшипників використовуються допоміжні магнітні опори [15]. Низькошвидкісні маховики можуть працювати як у звичайному повітрі, так і в частковому вакуумі або в легшому газі, щоб зменшити аеродинамічний супротив. Через охолоджуючий вплив повітря або газу на ротор замість машин з постійними магнітами можуть використовуватися машини з котушками збудження або асинхронні машини. Загалом, незважаючи на низьку питому енергію (1 Вт·год/кг), низькошвидкісні маховики забезпечують недорогу, міцну та надійну

					КРБ.141EE6d_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

конструкцію з простими компонентами.

Високошвидкісні маховики зазвичай розроблені для отримання високої питомої енергії, питомої потужності (десятки кВт/кг). Енергетична ємність зазвичай низька (0,01... кілька кВт·год). Зазвичай їх застосовують там, де потрібні екстремальні обмеження системи за вагою та об'ємом. Оскільки питома енергія E/m (Wh/kg) корпусу маховика пропорційна матеріалу питомої міцності (відношення міцності матеріалу σ_u до густини ρ) згідно з (формулою 12), високоміцні та легкі матеріали, тобто композитні матеріали, армовані волокном (питома міцність: 180... 240 Вт·год/кг) є кращим за метали (питома міцність: 12...66 Вт·год /кг).

$$\frac{E}{M} \propto K \cdot \frac{\sigma_u}{\rho} \quad (5)$$

де M — маса в кг;

σ_u — це міцність матеріалу на розрив;

ρ — густина;

K називається коефіцієнтом форми, залежно від геометричної конфігурації ротора та критерію відмови, типові значення — 0,3... 1.

Висока швидкість обертання робить неможливим використання звичайних механічних підшипників через великі втрати тертя. Ротор у такому випадку левітує на магнітних підшипниках, які зазвичай є складнішими та дорожчими. Щоб зменшити великі втрати динамічного опору газу, ротор знаходиться у вакуумі або частковому вакуумі. Це спричиняє труднощі і з розсіюванням нагрівання ротора. Тому у швидкісних маховиках використовують машини з постійними магнітами, які мають досить низькі втрати у роторі. Усі ці «високотехнологічні» компоненти (магнітна левітація, вакуум, швидкісна машина, двонаправлений інвертор потоку потужності) та спеціальні матеріали (композитні матеріали, магніти з рідкоземельних елементів) піднімають високошвидкісні маховики до високого рівня ціни, що у 5 разів вище, ніж у малошвидкісних маховиків, і забезпечує високу складність системи.

						КРБ.141EE60_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			29

Тому вони не є широко поширеними порівняно з існуючими технологіями зберігання енергії. (батареї, суперконденсатори...), особливо щодо небезпеки високої швидкості та виникнення системних помилок. Потенційні відмови можуть виникнути через тріщину в масі ротора, у керуванні магнітними підшипниками, або у системах силової електроніки. Захисна оболонка також додає складності та вартості системи. Однак високошвидкісні маховики залишаються привабливими на ринку зберігання енергії завдяки своїм винятковим перевагам: високому питомій потужності, майже повній відсутності зношення, а також придатності для надзвичайно високої кількості циклів з мінімальним обслуговуванням.

2.2 Характеристики маховика

Характеристики основних технологій зберігання енергії узагальнені та порівняні у (Таблиця 2.2). Маховики характеризуються високою щільністю потужності (Вт/кг) / (кВт/м³), високою кількістю циклів без зносу, низькими вимогами до обслуговування та низьким впливом на довкілля. Недоліки – високий саморозряд через внутрішні втрати та вищий ризик безпеки, ніж у інших засобів.

Маховики можуть швидко заряджатися і розряджатися, передаючи велику кількість енергії за секунди з високою ефективністю 85... 95% для швидкісних маховиків. Потужність заряджання та розрядження маховиків не залежить від ступеня розряду, на відміну від суперконденсаторів і акумуляторів. Швидкість розряду легко визначити, вимірюючи швидкість обертання. Велика кількість циклів не спричиняє проблем із деградацією маховиків, для яких суперконденсатори та батареї непорівнянні, оскільки їх зазвичай потрібно замінювати після 10... 15 років через деградацію.

Отже, перевага маховиків помітна у довгому терміні служби. Однак високий рівень саморозряду є критичним недоліком маховиків, що робить їх непридатними для довготривалого зберігання енергії, таких як батареї. Але цей недолік мало впливає на час зберігання до секунд, оскільки втрати незначні порівняно з

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

загальною перетвореною енергією.

Таблиця 2.2 - Характеристики технології зберігання електроенергії.

-	Суперконденсатори	Маховики	Свинцево-кислотні батареї	Літій-іонні батареї
Питома потужність (W/kg)	5.44 ... 100000	400 ... 30000	25 ... 415	8 ... 2000
Питома енергія (Wh/kg)	0.07 ... 85.6	5 ... 200	10 ... 50	30 ... 300
Питома потужність (кВт/м ³)	15 ... 4500	40 ... 2000	10 ... 400	56.8 ... 800
Густина енергії (кВт/м ³)	1 ... 35	0.25 ... 424	25 ... 90	94 ... 500
ККД (%)	65 ... 99	70 ... 96	63 ... 90	70 ... 100
Термін служби (роки)	5 ... 20	15 ... 20	3 ... 20	2 ... 20
Термін служби (цикли)	104 ... 10 ⁶	104 ... 10 ⁵ 105 ... 10 ⁷	100 ... 2000	250 ... 10 ⁵
Саморозряд (% на день)	0.46 ... 40	24 ... 100	0.033 ... 1.10	0.03 ... 0.33
Час перезарядки	сек... хвилина	< 15 хвилин	8...16 год.	година
Масштаб [МВт]	0 ... 5	0.001 ... 10	0 ... 50	0 ... 3
Вплив на довкілля	Дуже низько	Дуже низько	Високий	Високий/середній

З цього перевага маховиків помітна у довгому терміні служби. Однак високий рівень саморозряду є критичним недоліком маховиків, що робить їх непридатними для довготривалого зберігання енергії, таких як батареї. Але цей недолік мало впливає на час зберігання до секунд, оскільки втрати незначні порівняно з загальною перетвореною енергією. Потенційний ризик безпеки, пов'язаний із високою масою обертання, також є критичним недоліком маховиків

Висновок до розділу 2

Встановлено, що суттєвими недоліками є високий рівень саморозряду та підвищені вимоги до безпеки експлуатації через значну кінетичну енергію ротора.

Отримані результати свідчать про доцільність застосування маховикових накопичувачів енергії для підвищення якості електроенергії, компенсації короткочасних провалів напруги, стабілізації режимів роботи електричних мереж та забезпечення швидкодіючого резервного електроживлення споживачів.

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

3 ЗАСТОСУВАННЯ МАХОВИКІВ

Завдяки високій щільності потужності та високому саморозряду маховики підходять для короткострокового зберігання коли потрібне часте заряджання/розрядка при високому рівні потужності, тому втрата енергії незначна порівняно з перетвореною енергією [16-18]. Таблиця 3.1 узагальнює типові комерційно-промислові застосування маховиків. Ці застосування включають як великі масштаби в загальній мережі, так і малі на стороні клієнта. Зазвичай висока потужність і продуктивність досягаються шляхом розміщення маховиків рядами, а не використанням великих машин в одному модулі.

Таблиця 3.1 – Типові промислові застосування комерційно доступних маховиків.

Область застосування	Функціональність
Енергетичні системи	Інтеграція відновлюваних джерел Джерела живлення
	Стабілізація частоти та напруги
	Якість електроенергії та регулювання
	Згладжування напруги та потужності
	Безперебійне джерело живлення (UPS)
Мобільність (автомобілі, залізниця)	Регенерація енергії гальмування
Система запуску літаків, кораблі, кран, лабораторії	Блок живлення в комутації
Аерокосмічна промисловість	Контроль орієнтації супутника, резервне зберігання енергії

Їх можна згрупувати на звичайний тип і інтегрований. Більшість існуючих систем маховиків мають конфігурації (рисунок 3.1):

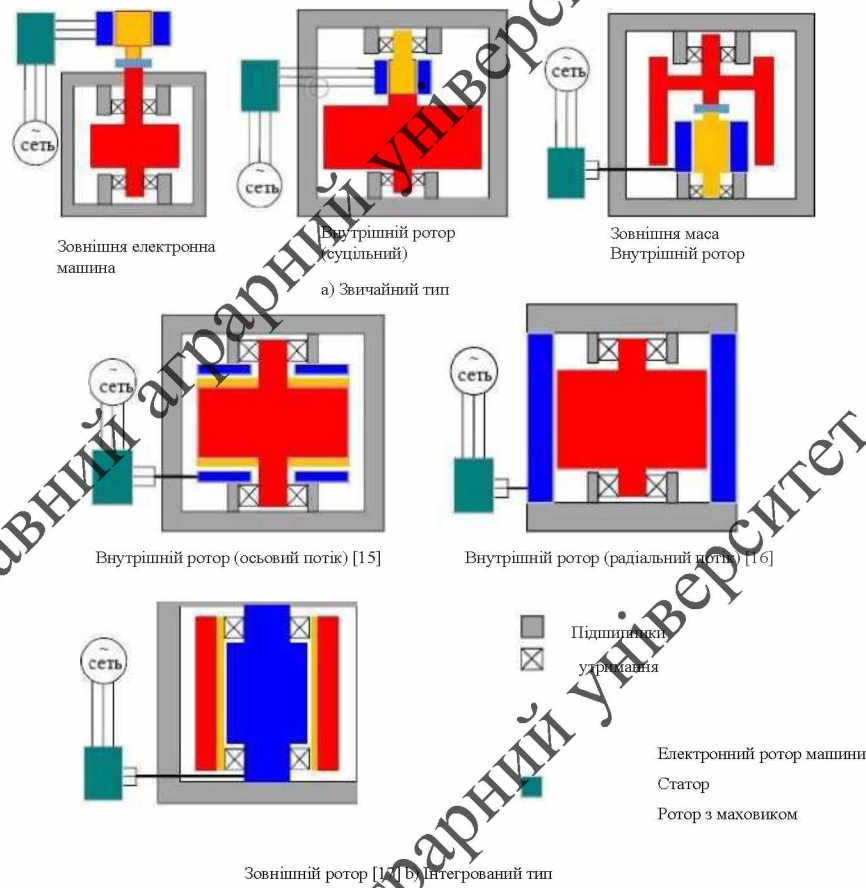


Рисунок 3.1 - Типові конфігурації систем маховиків

Для звичайного типу (рисунок 3.1).

Ротор маховика та Е-машина — це окремі блоки, з'єднані механічним зчепленням або одним валом. Машину можна розміщувати як всередині, так і зовні корпусу. Зовнішня машина має хороші умови охолодження, тому можна використовувати високопотужну та недорогу асинхронну машину. Але швидкість зазвичай повільна через механічні проблеми з компонентами з'єднання та герметизацією. Ротор маховика може бути суцільним або циліндричним (так званий тип внутрішнього ротора з зовнішньою масою). Останній тип — це поширена топологія для композитного обода ротора, з'єданого валом легкою втулкою, де простір всередині обода можна ефективно використовувати, що забезпечує компактну конструкцію. Але для сталевого ротора цей тип не підходить через високу густину і відносно низьку міцність матеріалу. Сталь більше підходить для виготовлення суцільного ротора.

Для інтегрованого типу (рисунок 3.1).

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		
						33

Ротор маховика також виконує роль частини потоку електронної машини, тому компонент зберігання енергії та джерело живлення інтегруються. Машина може бути традиційного радіального потоку або нового осьового типу. Осьовий потік може використовувати значну осьову силу, яка контролюється додатковою котушкою в обмотці статора, щоб протидіяти гравітаційній силі ротора, зменшуючи навантаження та тертя в підшипниках. Але для цього потрібна складна стратегія контролю як сили, так і крутного моменту. У радіальному магнітному потоці машина з РМ не підходить через низьку механічну міцність магнітів. Машина — це або машина з опором, або уніполярна машина з меншою густиною потужності, ніж машина з постійними магнітами.

Порівняно з конфігурацією внутрішнього ротора, зовнішній тип ротора має вищий ступінь інтеграції. Композитний обод ротора можна повністю левітувати за допомогою магнітних підшипників зовнішнього ротора без будь-якого з'єднання з ступицею, досягаючи ще більшої енергетичної густини та щільності енергії. Інтегрована конфігурація збільшує залежність між кожним компонентом. Незалежне проектування компонентів більше не актуальне, тому потрібні високі витрати на розробку, що можна вважати недоліком.

Традиційні механічні підшипники досі залишаються найпростішими та найпоширенішими рішеннями для низькошвидкісних маховиків. Але вони сильно зношуються на великій швидкості і потребують хорошого змащення та періодичного обслуговування. Керамічні та гібридні підшипники можуть використовуватися для збільшення терміну служби підшипників завдяки низькому коефіцієнту тертя та високій зносостійкості. Для систем на високошвидкісних маховиках, де знос або обслуговування є критичними проблемами, потрібні безконтактні магнітні підшипники (МП). Вони поділяються на пасивні магнітні підшипники (ПМП) та активні магнітні підшипники (АМП). ПМП використовують неконтрольовану силу, створену постійними магнітами, щоб підтримувати всю або частину ваги ротора. З точки зору АМП, силу можна контролювати залежно від положення та руху ротора. Однак магнітні підшипники також створюють втрати, які іноді можна порівняти з механічними. Паразитні втрати механічних і магнітних

						КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			34

підшипників зазвичай становлять 1... 5% накопиченої енергії на годину. Втрати підшипників спричиняють саморозряд маховика. Низькі втрати в підшипниках досягаються за допомогою підшипників високотемпературної надпровідності (HTSC). Втрати можна знизити до 0,1% від накопиченої енергії на годину, включно з втратами системи охолодження. Однак вартість підшипників HTS для промислових застосувань залишається не занадто високою.

Високошвидкісні маховики зазвичай розміщуються у вакуумному контейнері, де рівень вакууму коливається від сотень паскалів до 10^{-4} Па. Ще одна функція утримання — забезпечення безпеки у разі відмови ротора. Коли ротор розпадається, ізоляція повинна запобігати вильоту уламків і розсіювати кінетичну енергію через деформацію. Слід проводити дослідження маховиків, призначених для виробництва.

Щоб визначити, чи є вигідним використання маховика в системі, необхідно провести всебічну оцінку переваг і недоліків. Переваги різняться залежно від застосування.

3.1 Аналіз потоку потужності у фотоелектричних системах з маховиком

Пристрої зберігання енергії у фотогальванічних системах Off-Grid чи Hybrid можуть усунути невідповідність між годинами виробництва електроенергії та споживанням, накопичуючи надлишок енергії та зберігаючи її для подальшого використання за потреби. Таким чином, споживання електроенергії з мережі можна зменшити, збільшивши власне споживання фотогальванічних генерацій. Наразі ринок систем зберігання енергії для домашніх фотоелектричних установок домінує виключно акумулятори, з помітною тенденцією переходу від свинцево-кислотних (LA) батарей до літій-іонних (Li-ion). Порівняно з акумуляторами, маховики мають довший термін служби (кількість циклів) без проблем з деградацією та незначного впливу на довкілля. Ідея використання маховиків у фотогальванічних системах вже була запропонована значно раніше, хоча було встановлено, що звичайні маховики не можуть конкурувати з акумуляторами ні технічно, ні економічно. Але, згідно з

					КРБ.141EE6d_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

цим, якщо маховик спроектований із вбудованими функціями перетворення постійного струму у змінний і відстеженням максимальної потужності, маховик буде технічно та економічно конкурентоспроможним із системою на основі батарей з інверторним перетворенням енергії. На основі цієї ідеї було створено прототип маховика з накопичувальною спроможністю 4 кВт·год і потужністю 500 Вт. Ротор, який знаходиться на магнітній левітації, має максимальну швидкість обертання 15000 хв⁻¹ і працює у вакуумі [19].

Експериментальні вимірювання показують, що загальна енергоефективність системи на основі маховика, включно з силовою електронікою, становить 68% (з втратою накопиченої енергії приблизно 1,5% на годину), що трохи вище, ніж система на батареях 65% (враховуючи 80% для батарей, 85% для інвертора, 96% для MPPT). Це порівняння сьогодні некоректне, оскільки ефективність і продуктивність батарей значно зросли, тобто до 85... 95% для літій-іонних батарей. По-друге, вимірювана ефективність зосереджена на ефективності перетворення енергії прототипа, а не на циклічному режимі у фотогальванічній системі, де втрата без навантаження в маховику стає критичною, а не на втратах енергії за цикл у годинах.

3.2 Будова та стратегія системи

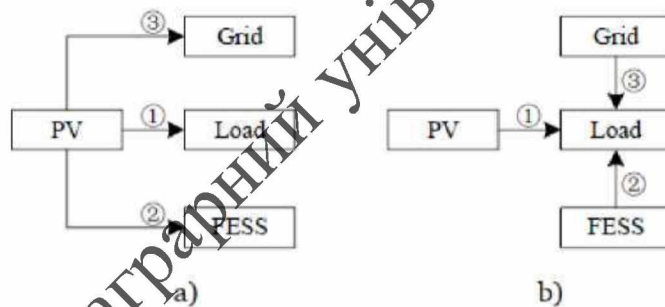
Домашня фотоелектрична система, що розглядається, розроблена для максимізації самоспоживання електроенергії.

Основні компоненти побутової фотогальванічної системи з FESS показані на (Рисунок 23): Система фотогальванічної генерації ("PV"), Домашнє споживання ("Load"), Система зберігання ("FESS") та "Grid" Grid, яка також може забезпечувати домогосподарство електроенергією, а також як отримати надлишкову енергію з PV-системи. Залежно від різних поколінь і споживання, існують різні умови для потоку енергії між компонентами в системах. Їх можна поділити на два режими роботи.

Домінантний режим генерації (режим А) та

					КРБ.141EE6d_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Домінуюче споживання (режим b) (Рисунок 3.2):



Фіг. 3.2 - Режими роботи фотогальванічної системи: а) Режим А - домінуюча генерація, б) Режим В - домінуюче споживання.

Режим а) виникає, коли генерація фотоелектричної енергії перевищує споживання: $P_{PV} > P_L$ (P_{PV} : Фотогальванічна генераційна потужність, $P_{PV} > 0$; P_L : потужність навантаження, $P_L > 0$). Генерація фотоелектричної енергії спочатку відповідає навантаженням і зберігає надлишкову енергію у FESS. Після повного заряджання FESS або досягнення ліміту зарядної потужності, залишкова генерація надходить у мережі.

Якщо $P_{PV} < P_L$, система працює в режимі В. Споживання здійснюється різними джерелами відповідно до пріоритету. Спочатку для виконання навантаження використовується вся фотогальванічна генерація. Потім FESS розряджається для покриття залишкового навантаження. Якщо FESS порожній або залишкова потужність перевищує номінал FESS, додаткова енергія купується з мережі.

Визначаючи вихідну потужність FESS як P_{FW} ($P_{FW} > 0$ для розряду; $P_{FW} < 0$ для зарядки) та споживання електроенергії від мережі як P_g ($P_g > 0$ для споживання; $P_g < 0$ для віддачі в мережу), енергетичний баланс системи можна представити наступним виразом.

$$P_{PV} + P_{FW} + P_g = P_L \quad (6)$$

Таким чином, потік потужності системи визначається для оцінки наступного етапу.

					КРБ.141EE6d_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Для кількісної оцінки результатів симуляції використовуються два абсолютні індикатори. Перший, розрахований за формулою 14, — це економія електроенергії в мережі (E_{save}). Порівняно з господарством з таким самим профілем навантаження, але без фотоелектричної системи та зберігання. Інший — це енергія, що подається в мережу ($E_{\text{feed in}}$), визначена (формула 7). Верхній індекс «+» означає позитивне значення, а «-» — негативне значення.

$$E_{\text{save}} = \Sigma(P_L - P_g^+) \cdot \Delta t, \quad (7)$$

$$E_{\text{feed in}} = \Sigma(P_g^-) \cdot \Delta t. \quad (8)$$

Окрім цих двох абсолютних показників, зазвичай використовують три відносні показники: самодостатність ξ , самовитратність γ та енергоефективність маховика η , розраховані за формулою (формулами 9 ... 11). Слід зазначити, що енергетична ефективність η тут визначається величиною енергії (у кВт·год), що віддається з маховика. Це відрізняється від нормально визначеної ефективності щодо потужності та втрат у ватах.

$$\xi = 1 - \frac{\Sigma P_g^+ \cdot \Delta t}{\Sigma P_L \cdot \Delta t}, \quad (9)$$

$$\gamma = 1 - \frac{\Sigma P_g^- \cdot \Delta t}{\Sigma P_{PV} \cdot \Delta t}, \quad (10)$$

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P_{FW}^+ \cdot \Delta t}{\Sigma P_{FW}^- \cdot \Delta t}. \quad (11)$$

Висновок до розділу 3

Розглянуто основи системи зберігання маховиків, наведені характеристики низькошвидкісних і високошвидкісних маховиків. Маховики характеризуються

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

високою питомою потужністю (Вт/кг) та питомою потужністю (кВт/м³), високим циклом без зносу, низькими вимогами до обслуговування та низьким впливом на навколишнє середовище. Недоліки — високій саморозряд через внутрішні втрати та вищий ризик безпеки, ніж у інших приводів.

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Заходи безпеки під час монтажу енергетичних установок

Виконання робіт в електроустановках відповідно до вимог безпеки поділяють на три основні категорії [20]:

- 1) роботи, що виконуються після відключення напруги;
- 2) роботи без відключення напруги на струмопровідних елементах або поблизу них;
- 3) роботи, які проводяться без відключення напруги на неструмовідних частинах, що перебувають під напругою.

Якщо роботи одночасно проводяться в електроустановках з напругою як до 1000 В, так і вище 1000 В, їх категорію визначають відповідно до вимог для електроустановок напругою понад 1000 В.

До робіт зі знеструмленням належать операції, що виконуються в електроустановці або окремій її частині, де з струмопровідних елементів повністю знято напругу, а доступ до ділянок, які залишаються під напругою, унеможливлений.

Роботами без відключення напруги на струмопровідних елементах чи поблизу них вважаються роботи, які здійснюються безпосередньо на таких частинах. Виконання подібних робіт дозволяється щонайменше двом працівникам: керівник повинен мати IV групу з електробезпеки, а інші виконавці – не нижче III групи.

В електричних установках із напругою понад 1000 В виконання робіт без відключення живлення на частинах, що проводять струм, а також поблизу них, необхідно здійснювати із використанням захисних засобів, які забезпечують ізоляцію працівника від струмоведучих елементів або поверхні землі. Якщо працівника ізолювано від землі, такі роботи потрібно проводити відповідно до

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

спеціально розроблених інструкцій чи технологічних карт, де визначено всі необхідні вимоги безпеки.

Під час виконання робіт в електроустановках з напругою до 1000 В без вимкнення живлення на струмоведучих елементах або поряд із ними потрібно:

- забезпечити інші розташовані поблизу робочої зони частини під напругою, до яких можливе випадкове торкання;
- використовувати діелектричне взуття, працюючи на ізолювальній підставці чи діелектричному килимку;
- необхідно використовувати інструмент, оснащений ізолювальними ручками (у викруток також має бути ізольований металевий стрижень). Якщо такого обладнання немає, потрібно працювати у діелектричних рукавичках.

Під час проведення робіт під напругою на струмопровідних елементах із застосуванням ізолювальних захисних засобів слід дотримуватися таких вимог:

- утримувати захисні засоби лише за руків'я до обмежувального кільця;
- розташовувати ізольовані частини таким чином, щоб уникнути перекриття ізоляції між фазами або замикання на землю;
- застосовувати виключно сухі, чисті та справні ізолювальні елементи із неущкодженним лаковим шаром.

Якщо виявлено пошкодження лакового покриття чи інші дефекти ізолювальних елементів, їх використання не допускається.

Під час виконання робіт із використанням електрозахисних пристроїв (ізолювальних штанг, кліщів, електровимірювальних кліщів, покажчиків напруги) працівникові дозволяється наближатися до струмопровідних частин на дистанцію, що визначається довжиною ізолювальної частини відповідного засобу захисту.

Працівники, що перебувають у приміщеннях із діючим електроустаткуванням електростанцій та підстанцій (окрім щитів керування релейного захисту й аналогічних приміщень), а також у ЗРУ, ВРУ, колодязях, тунелях і траншеях, повинні обов'язково використовувати захисні каски.

Якщо виявлено пошкодження лакового шару або інші дефекти ізолювальних елементів засобів захисту, застосовувати такі засоби не дозволяється.

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Під час виконання робіт із використанням електрозахисних пристроїв (ізолювальних штанг, кліщів, електровимірювальних кліщів, покажчиків напруги) працівникові дозволяється наближатися до струмовідних частин на дистанцію, що визначається довжиною ізолювальної частини зазначених засобів.

4.2 Перша домедична допомога при ураженні електричним струмом

Перша домедична допомога являє собою сукупність дій, спрямованих на підтримання чи відновлення стану здоров'я постраждалих. Такі заходи можуть здійснюватися особами без медичної освіти у порядку взаємодопомоги або самим потерпілим у вигляді самопомоги [21]. Основною умовою ефективності першої допомоги є оперативність її надання. Чим раніше виконано необхідні дії, тим вищою є ймовірність позитивного результату.

Порядок надання першої допомоги передбачає:

- усунення дії небезпечних чинників, що становлять загрозу життю чи здоров'ю людини, а також оцінювання стану постраждалого;
- встановлення виду та ступеня тяжкості ушкодження, визначення найбільшої небезпеки для життя і черговості рятувальних заходів;
- проведення невідкладних рятувальних дій відповідно до рівня терміновості (забезпечення прохідності дихальних шляхів, виконання штучної вентиляції легень, непрямого масажу серця);
- підтримання життєво важливих функцій організму до прибуття медичних працівників;
- виклик бригади екстреної медичної допомоги або організацію доставлення потерпілого до найближчої медичної установи.

Для відокремлення постраждалого від струмопровідних елементів чи проводу з напругою до 1000 В необхідно використати канат, дерев'яну палицю, дошку або інший сухий предмет, який не проводить електричний струм.

Якщо струм проходить через людину в землю, а потерпілий свідомо утримує провід, найдоцільніше розірвати електричне коло, ізолювавши його від землі. Для

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Переміщувати потерпілого в інше місце потрібно лише тоді, коли для нього або рятувальника зберігається небезпека, чи якщо надати допомогу безпосередньо на місці неможливо. Щоб уникнути втрати часу, одяг із постраждалого знімати не рекомендується. Під час виконання штучного дихання не обов'язково забезпечувати горизонтальне положення тіла. У разі перебування людини на висоті штучне дихання слід починати одразу — у люльці, на опорі або щоглі — ще до спуску вниз.

Після транспортування потерпілого на землю потрібно негайно приступити до проведення штучного дихання та непрямого масажу серця. Реанімаційні заходи виконують до появи самостійного дихання, відновлення серцевої діяльності або до передачі постраждалого працівникам медичної служби.

Висновок до розділу 4

Було розглянуто основні вимоги охорони праці під час монтажу та експлуатації енергетичних установок, а також порядок надання першої домедичної допомоги при ураженні електричним струмом. Встановлено, що безпеку виконання робіт в електроустановках забезпечується дотриманням правил електробезпеки, використанням справних електрозахисних засобів, засобів індивідуального захисту та чіткою організацією робіт залежно від категорії їх виконання. Особливу увагу приділено вимогам під час роботи під напругою та заходам щодо запобігання травматизму персоналу. Також визначено основні принципи надання домедичної допомоги постраждалим від дії електричного струму, що включають швидке усунення небезпечного чинника, оцінювання стану потерпілого та проведення реанімаційних заходів до прибуття медичних працівників. Дотримання наведених вимог сприяє зниженню ризику нещасних випадків і забезпеченню безпечних умов праці під час виконання електромонтажних робіт.

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

5. У даному розділі розглянуто принцип роботи системи накопичення електричної енергії на основі маховика та її взаємодію з електричною мережею через силові електронні перетворювачі. Встановлено, що система може працювати у трьох основних режимах: заряджання, очікування та розряджання, забезпечуючи накопичення енергії у вигляді кінетичної енергії обертового ротора та її швидке повернення до мережі під час виникнення відхилень режиму роботи.
6. Порівняння маховикових накопичувачів з іншими технологіями зберігання електроенергії показало, що їх основними перевагами є висока швидкодія, значна питома потужність, високий коефіцієнт корисної дії, тривалий термін служби та здатність витримувати велику кількість циклів заряджання-розряджання без суттєвої деградації характеристик. Разом із цим встановлено, що суттєвими недоліками є високий рівень саморозряду та підвищені вимоги до безпеки експлуатації через значну кінетичну енергію ротора.

У даному розділі було розглянуто особливості застосування маховикових систем накопичення енергії в сучасних системах електрозабезпечення. Проведено аналіз конструктивних рішень, принципів роботи та основних сфер використання маховиків, зокрема в електроенергетичних системах, транспорті, аерокосмічній галузі та системах безперебійного живлення.

8. Було розглянуто особливості та основні конфігурації застосування маховикових систем накопичення енергії в сучасних системах електрозабезпечення. Проведено аналіз конструктивних рішень, принципів роботи та основних сфер використання маховиків, зокрема в електроенергетичних системах, транспорті, аерокосмічній галузі та системах безперебійного живлення.
9. Особливу увагу приділено аналізу роботи фотоелектричних систем із маховиковими накопичувачами енергії. Досліджено режими енергетичних потоків між фотоелектричною установкою, навантаженням, накопичувачем та електричною мережею. Встановлено, що використання маховика дає змогу підвищити рівень власного споживання електроенергії, зменшити навантаження на мережу та покращити енергетичну автономність споживача.

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

10. Проведений аналіз показав, що маховикові накопичувачі найбільш ефективні для короткочасного зберігання енергії, швидкого заряджання та розряджання, стабілізації режимів роботи електричних мереж і компенсації короткочасних коливань генерації відновлюваних джерел енергії.
11. Розглянуто основні вимоги охорони праці під час монтажу та експлуатації енергетичних установок, а також порядок надання першої домедичної допомоги при ураженні електричним струмом. Встановлено, що безпечне виконання робіт в електроустановках забезпечується дотриманням правил електробезпеки, використанням справних електрозахисних засобів, засобів індивідуального захисту та чіткою організацією робіт залежно від категорії їх виконання. Особливу увагу приділено вимогам під час роботи під напругою та заходам щодо запобігання травматизму персоналу.
12. Також визначено основні принципи надання домедичної допомоги постраждалим від дії електричного струму, що включають швидке усунення небезпечного чинника, оцінювання стану потерпілого та проведення реанімаційних заходів до прибуття медичних працівників.

					КРБ.141ЕЕ6д_31[1].15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47