Форма № Н-9.02

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем
(назва кафедри)

к.т.н., доц. _____ Євген АНТИПОВ
(підпис)

„____” _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **“Проєктування промислової системи накопичення енергії на базі $LiFePO_4$ акумуляторів для компенсації піків навантаження”**

Спеціальність 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

02.03 – КР. 2708 "С" 2025.07.11 007 ПЗ

Гарант освітньої програми
к.т.н., доцент _____ Олександр СИНЯВСЬКИЙ
(науковий ступінь та вчене звання) **(Підпис)** **(ПІБ)**

Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи

к.ф.-м.н., асист. _____ Остап ЯЦУН
(науковий ступінь та вчене звання) **(Підпис)** **(ПІБ)**

Виконав _____ Андрій ШВАН
(Підпис) **(ПІБ студента)**

КИЇВ – 2026

Форма № Н-9.01

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем
(назва кафедри)

к.т.н., доц. _____ Євген АНТИПОВ
(підпис)

„____” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту
Швану Андрію Валерійовичу

Спеціальність (напрям підготовки): 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"
Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: "Проєктування промислової системи накопичення енергії на базі $LiFePO_4$ акумуляторів для компенсації піків навантаження"
затверджена наказом ректора НУБіП України від "07" 11. 2025 р. № 2708 «С»
Термін подання завершеної роботи на кафедру "29" травня 2026 р.

Перелік питань, які потрібно вирішити: 1. Проаналізувати сучасний стан проблеми пікових навантажень у промислових електромережах та визначити технічні й економічні наслідки їх виникнення. 2. Обґрунтувати вибір стратегії компенсації пікових навантажень і виконати розрахунок параметрів акумуляторної системи $LiFePO_4$. 3. Оцінити вплив системи накопичення енергії на режим роботи електричної мережі, зокрема на струмові навантаження, напругу та роботу силового трансформатора. 4. Проаналізувати етапи інжинірингового проєктування системи накопичення та дослідити структурну схему електроенергетичної системи промислового об’єкта. 5. Виконати оцінку енергоефективності та техніко-економічної доцільності впровадження системи накопичення енергії на основі $LiFePO_4$ акумуляторів.
Перелік графічних документів: презентація виконана в Microsoft PowerPoint – 14 слайдів

Дата видачі завдання: 07.11.2025 р.

Керівник роботи
к.ф.-м.н., асист. _____ Остап ЯЦУН
(науковий ступінь та вчене звання) (Підпис) (ПІБ)
Завдання прийняв до виконання _____ Андрій ШВАН
(Підпис) (ПІБ)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ……6

ВСТУП……..7

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ…….9

1.1. Сучасний стан та проблеми пікових навантажень у промислових електромережах……...9

1.2. Класифікація та принципи роботи систем накопичення електричної енергії……..10

1.3. Технічні характеристики та переваги $LiFePO_4$ акумуляторів……13

1.4. Світовий досвід застосування $LiFePO_4$ акумуляторів для компенсації піків навантаження……15

Висновки до розділу 1……...16

РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ $LiFePO_4$ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ…….17

2.1. Загальна характеристика промислового об’єкта електропостачання…….17

2.2. Аналіз режимів електроспоживання…….18

2.3. Вибір стратегії компенсації пікових навантажень……...20

2.4. Розрахунок параметрів акумуляторної системи $LiFePO_4$ та вибір схеми підключення……22

2.5. Вплив системи накопичення на режим роботи мережі……..26

Висновки до розділу 2……..28

РОЗДІЛ 3. ІНЖИНІРИНГОВЕ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ……...30

3.1. Аналіз етапів інжинірингу промислової системи накопичення……..30
3.2. Дослідження структурної схеми електроенергетичної системи…….33
3.3. Проєктування технічних рішень для ефективного накопичення енергії на базі $LiFePO_4$ акумуляторів……..38
Висновки до розділу 3……...44
РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ……45
4.1. Аналіз потенційних ризиків експлуатації акумуляторних систем….45
4.2. Заходи з охорони праці та техніки безпеки……..48
4.3. Розробка рекомендацій щодо безпечної експлуатації електроустановок……...51
Висновки до розділу 4……...54
РОЗДІЛ 5. ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ……...56
5.1. Аналіз змін енергоспоживання при впровадженні системи накопичення……...56
5.2. Аналіз впливу $LiFePO_4$ системи накопичення на режим роботи мережі…….57
5.3. Техніко-економічна оцінка впровадження системи накопичення енергії на базі $LiFePO_4$ акумуляторів……..59
Висновки до розділу 5……...60
ВИСНОВКИ……...62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……..64
ДОДАТКИ……..67

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» виконаний у Національному університеті біоресурсів і природокористування України, Київ, 2026 р.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка та техніко-економічне обґрунтування впровадження системи накопичення електричної енергії на базі $LiFePO_4$ акумуляторів для промислового об’єкта з метою компенсації пікових навантажень та оптимізації режимів електроспоживання.

Об’єктом дослідження є електроенергетична система промислового підприємства з нерівномірним графіком навантаження та наявністю виражених пікових періодів споживання.

Предметом дослідження є проєктування, розробка та впровадження $LiFePO_4$ системи накопичення енергії в мережу підприємства.

У роботі проведено аналіз режимів електроспоживання промислового об’єкта, обґрунтовано стратегію компенсації пікових навантажень, виконано розрахунок параметрів акумуляторної системи $LiFePO_4$ та вибір схеми її підключення. Оцінено вплив накопичувача на режим роботи трансформаторів, кабельних ліній і показники якості електроенергії. Проведено аналіз змін режимів електроспоживання до та після впровадження системи накопичення, зокрема оцінено згладжування пікових навантажень, перерозподіл споживання в часі та зменшення максимальних значень потужності, а також виконано техніко-економічну оцінку доцільності впровадження $LiFePO_4$ системи для промислового об’єкта.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ККД – коефіцієнт корисної дії

BMS – система керування батареєю

EMS – система керування енергоспоживанням

ENTSO-E – Європейська мережа операторів систем передачі електроенергії

ESS – системи накопичення енергії

$LiFePO_4$ акумулятори – літій-залізо-фосфатні акумулятори

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку енергетики питання підвищення ефективності використання електричної енергії на промислових підприємствах набуває вагомого значення. Нерівномірність графіків навантаження, наявність короткочасних, але інтенсивних пікових режимів, зростання вартості електроенергії та обмеження приєднаної потужності призводять до пошуку нових технічних рішень. Одним із таких рішень є впровадження систем накопичення електроенергії, які дозволяють згладжувати графік споживання та зменшувати навантаження на мережеву інфраструктуру. Особливо перспективними в цьому напрямі є акумуляторні системи на базі літій-залізо-фосфатної технології, що поєднують високу циклічну стійкість, безпечність експлуатації та стабільність електричних характеристик.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю пошуку ефективних способів оптимізації режимів електроспоживання промислових об’єктів без суттєвої реконструкції існуючих мереж. Дуже часто на підприємствах виникають ситуації коли середнє споживання залишається помірним, але окремі пікові періоди формують підвищені вимоги до електричної системи. Це призводить до додаткових витрат, прискореного зношування обладнання та зниження загальної енергоефективності. Використання систем накопичення дозволяє вирішити ці проблеми шляхом часткового покриття пікової складової навантаження за рахунок автономного джерела.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка та техніко-економічне обґрунтування впровадження системи накопичення електричної енергії на базі $LiFePO_4$ акумуляторів для промислового об’єкта з метою компенсації пікових навантажень та оптимізації режимів електроспоживання.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан проблеми пікових навантажень у промислових електромережах та визначити технічні й економічні наслідки їх виникнення.

2. Обґрунтувати вибір стратегії компенсації пікових навантажень і виконати розрахунок параметрів акумуляторної системи $LiFePO_4$.

3. Оцінити вплив системи накопичення енергії на режим роботи електричної мережі, зокрема на струмові навантаження, напругу та роботу силового трансформатора.

4. Проаналізувати етапи інжинірингового проєктування системи накопичення та дослідити структурну схему електроенергетичної системи промислового об’єкта.

5. Виконати оцінку енергоефективності та техніко-економічної доцільності впровадження системи накопичення енергії на основі $LiFePO_4$ акумуляторів.

Під час виконання дослідження були використані окремі елементи методів аналізу електричних навантажень, розрахункові методи визначення параметрів трифазних систем змінного струму, а також елементи порівняльного та техніко-економічного аналізу.

Наукова новизна роботи полягає в комплексному підході до оцінки впливу $LiFePO_4$ системи накопичення на режим роботи мережі промислового об’єкта з урахуванням особливостей добового графіка споживання, теплового навантаження на трансформатор та показників якості електроенергії.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості застосування розроблених підходів при модернізації систем електропостачання промислових підприємств. Запропоновані розрахунки та технічні рішення можуть бути використані при проєктуванні систем накопичення для об’єктів із подібним характером навантаження, що дозволить підвищити надійність електропостачання, зменшити пікові струми та оптимізувати використання приєднаної потужності без зміни технологічних процесів.

РОЗДІЛ 1
ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ

1.1. Сучасний стан та проблеми пікових навантажень у промислових електромережах

Пікові навантаження в промислових електромережах сьогодні є однією з основних причин підвищених витрат і зниження надійності електропостачання. На практиці «пік» виникає не тому, що підприємство постійно споживає багато, а тому, що в короткі проміжки часу одночасно запускаються енергоємні механізми: компресори, печі, насоси, вентиляційні системи, зварювальне обладнання, електроприводи тощо [1]. Такі пікові навантаження мережа повинна витримати без просідань напруги та аварійних відключень.

Проблема загострюється тим, що пікові години мають системний характер - зростання споживання найчастіше фіксується у ранковий та вечірній час. Оператор системи передачі виділяє «пікові години» (ранок 8:00-11:00 та вечір 17:00-23:00) та закликає обмежувати споживання саме в цей час. Це означає, що промисловий пік часто накладається на пік побутового споживання, тому ризики дефіциту потужності й обмежень подвоюються [2].

З технічного боку пікові навантаження призводять до перевантаження силових елементів (трансформаторів, кабельних ліній, комутаційної апаратури) та прискореного старіння ізоляції. У звітах ENTSO-E описуються випадки, коли перевантаження трансформатора виступало одним із факторів розвитку аварійної події [3]. Окремо варто враховувати й економічний аспект: підприємства вимушені «платити за максимум» через потребу резервувати потужність при приєднанні та розвитку мережі, що відображається у ставках плати за приєднання потужності, затверджених регулятором. Також нерівномірні графіки навантаження збільшують втрати електроенергії в мережі та ускладнюють оптимізацію режимів [4].

Таблиця 1.1

Проблеми та наслідки пікових навантажень

Проблема	Технічні наслідки	Економічні наслідки
Перевищення максимального навантаження	Перегрів трансформаторів, перевантаження кабельних ліній	Плата за перевищення договірної потужності
Просідання напруги при одночасному запуску обладнання	Порушення якості електроенергії	Штрафи за відхилення параметрів
Нерівномірний добовий графік споживання	Зростання втрат у мережі	Збільшення операційних витрат
Накладання промислового та побутового піку	Дефіцит пропускної здатності мережі	Ризик обмежень електропостачання
Необхідність резервування великої приєднаної потужності	Надлишкова встановлена потужність	Високі ставки плати за приєднання

З таблиці 1.1 бачимо, що сучасний стан промислових електромереж характеризується поєднанням технічних (перевантаження, просідання напруги, зростання втрат) та економічних (оплата приєднаної/пікової потужності, штрафи, обмеження) наслідків пікових навантажень, що робить актуальним застосування систем накопичення енергії для їх згладжування.

Підсумовуючи можна сказати, що застосування $LiFePO_4$ акумуляторів дозволяє не лише зменшити максимальне навантаження на мережеві елементи, а й оптимізувати графік споживання електроенергії відповідно до тарифної політики та технічних обмежень. У результаті підприємство отримує інструмент підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат і забезпечення стабільності електропостачання в умовах зростаючої варіативності навантажень.

1.2. Класифікація та принципи роботи систем накопичення електричної енергії

Системи накопичення електричної енергії (СНЕ) відіграють важливу роль у забезпеченні стабільності роботи сучасних електромереж, зокрема в умовах нерівномірного графіка споживання та зростання частки відновлюваних джерел енергії. Їх застосування дозволяє згладжувати пікові навантаження (рис. 1.1),

підвищувати якість електроенергії, забезпечувати резервування живлення та оптимізувати режими роботи енергосистем [5].

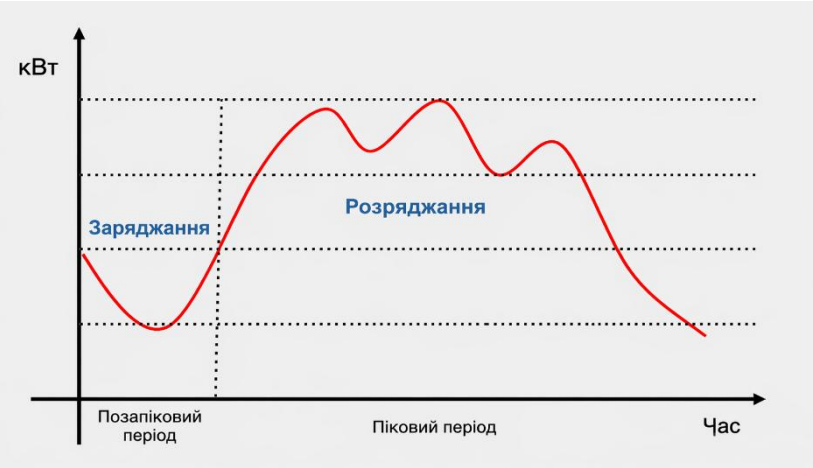


Рис. 1.1 Системи накопичення енергії для згладжування піків навантаження

Класифікація систем накопичення електричної енергії може здійснюватися за різними ознаками: за фізичним принципом зберігання енергії, за тривалістю зберігання, за масштабом потужності, а також за функціональним призначенням [6]. Найбільш поширеним є поділ за фізичною формою зберігання енергії (табл. 1.2), оскільки саме вона визначає технічні характеристики системи, швидкодію та сферу її доцільного застосування.

Таблиця 1.2

Класифікація систем накопичення електричної енергії

Тип системи	**Фізична форма зберігання**	**Характер реакції на навантаження**	**Сфера застосування**
Електрохімічні	Хімічна енергія в акумуляторних елементах	Середня та висока швидкодія, регульована тривалість віддачі	Резервне живлення, тарифна оптимізація
Електричні (суперконденсатори)	Енергія електричного поля	Дуже висока швидкодія, короткочасна віддача	Компенсація імпульсних навантажень
Механічні	Кінетична або потенціальна енергія	Швидка реакція, значний ресурс циклів	Стабілізація режимів, підтримка напруги
Теплові та пневматичні	Теплова енергія або енергія стисненого газу	Порівняно повільна реакція, тривале зберігання	Довготривале вирівнювання графіків

Електрохімічні накопичувачі є найбільш універсальними для промислових електромереж, оскільки дозволяють керувати як потужністю, так і тривалістю розряду. Саме ця група сьогодні отримала найбільше практичне поширення завдяки розвитку літій-іонних технологій.

Суперконденсатори характеризуються високою швидкодією та здатністю працювати з великою кількістю циклів заряду-розряду, однак через невелику енергоємність вони застосовуються переважно для компенсації короткочасних провалів або імпульсних навантажень.

Механічні системи, зокрема інерційні накопичувачі, забезпечують швидку віддачу потужності та мають тривалий ресурс роботи, але їх конструктивна складність і вимоги до експлуатації обмежують сферу застосування.

Системи з проміжним перетворенням енергії (теплові, пневматичні) орієнтовані на зберігання значних обсягів енергії протягом тривалого часу, однак менш придатні для оперативного регулювання промислових навантажень.

Класифікація систем накопичення електричної енергії дозволяє визначити їх функціональні можливості та обґрунтувати вибір конкретної технології залежно від режиму роботи електромережі. Для задач компенсації пікових навантажень у промисловості найбільш перспективними є електрохімічні системи, зокрема літій-іонні накопичувачі (Додаток А) з підвищеною термічною та циклічною стабільністю [7].

Принцип роботи СНЕ зводиться до двох режимів: заряд і розряд. Під час заряду система забирає енергію з мережі або від генерації та переводить її у внутрішній запас, а під час розряду робить зворотне і підтримує споживача або мережу, коли це потрібно. Для промислових мереж важливо, що СНЕ можна налаштувати не тільки «на години», а й на секунди: вона реагує на зміну навантаження та згладжує пікові стрибки, підтримуючи стабільніші параметри живлення. У реальних проєктах вирішальними стають показники ємності та допустимої потужності, ККД перетворень, швидкодія, глибина розряду, ресурс циклів і вимоги до безпеки. Окрему роль відіграє силова електроніка та система керування: саме вони узгоджують роботу накопичувача з електромережею,

контролюють струми й напруги та забезпечують надійний режим роботи в різних сценаріях роботи підприємства [8].

1.3. Технічні характеристики та переваги $LiFePO_4$ акумуляторів

$LiFePO_4$ акумулятори у промислових системах накопичення енергії розглядають як один із найбільш збалансованих варіантів, коли важлива не лише висока енергоємність, а й прогнозована робота в режимі частих циклів. Їхня особливість полягає у хімічній стабільності катодного матеріалу на основі фосфату заліза. На практиці це означає, що батарея краще переносить підвищені температури та менш чутлива до помилок експлуатації порівняно з деякими іншими літієвими сполуками. Для промислового об'єкта це критично, бо система працює поруч з електрообладнанням, пилом, вібраціями, нерівномірними тепловими режимами та інколи обмеженою вентиляцією [9].

Таблиця 1.3

Переваги $LiFePO_4$ акумуляторів

Перевага	Суть	Практичне значення
Високий ресурс циклів	3000–7000 циклів при глибокій циклічності (до 80%)	8-12 років експлуатації без заміни
Швидке заряджання	До 90% ємності менш ніж за 2 години	Швидке відновлення після збоїв
Плоска крива напруги	Стабільна напруга протягом більшої частини розряду	Передбачувана робота інвертора та стабільна потужність
Робота при високих струмах	Швидко віддають і приймають потужність	Ефективне врівноваження піків
Термічна стабільність	Менший ризик теплового розгону	Підвищена безпека
Робота з BMS	Контроль температури, напруги, балансування	Довготривала та контрольована експлуатація

З таблиці 1.3 бачимо, що однією з головних переваг $LiFePO_4$ акумуляторів у системах резервного живлення базових станцій мобільного зв'язку, телекомунікаційних вузлів та промислових об'єктів є їх висока довговічність. Такі об'єкти забезпечують до 3000–7000 циклів заряд-розряд при глибокій циклічності (до 80%) без значної втрати ємності, що еквівалентно 8-12 рокам експлуатації за стандартних умов. Ще одна важлива характеристика – це швидкість зарядки (рис. 1.2), адже $LiFePO_4$ акумулятори заряджаються значно

швидше за свинцево-кислотні. До 90% заряду досягається менш ніж за 2 години, без перегріву чи прискореного зносу. Швидка зарядка критично важлива для обладнання, яке має якнайшвидше відновити роботу після збою.

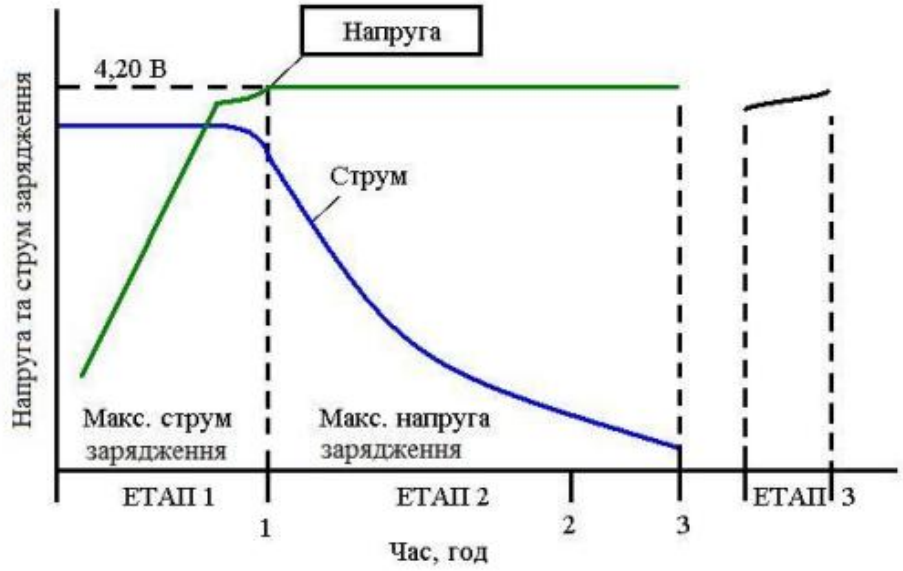


Рис. 1.2 Стандартний процес зарядження літій-іонного акумулятора

З технічної точки зору, $LiFePO_4$ має відносно «плоску» крину напругу розряду, тобто напруга зменшується повільно і передбачувано на більшій частині ємності. Це спрощує керування інвертором та підтримку стабільної потужності під час розряду, що корисно саме для задачі компенсації піків навантаження [10]. Такі батареї добре працюють у режимі високих струмів: вони можуть швидко віддавати потужність і так само приймати її під час заряду, якщо система керування та силова електроніка правильно підібрані. Водночас, $LiFePO_4$ акумулятори зазвичай орієнтовані на довший термін служби, оскільки витримують велику кількість циклів при робочих глибинах розряду, що напряму впливає на економіку проєкту: рідше потрібна заміна модулів і простіше планувати техобслуговування.

Ще однією перевагою є нижчий рівень ризиків теплового розгону та краща повторюваність параметрів у часі. Це забезпечується завдяки поєднанню з BMS, яка контролює напругу комірок, температуру та балансування, що забезпечує стабільну та передбачувану роботу у промислових циклічних режимах [11].

Як бачимо, $LiFePO_4$ акумулятори демонструють збалансоване поєднання ресурсу, швидкодії та безпеки, що робить їх доцільними для застосування у промислових системах накопичення енергії.

1.4. Світовий досвід застосування $LiFePO_4$ акумуляторів для компенсації піків навантаження

Світовий досвід свідчить, що $LiFePO_4$ акумулятори набули широкого поширення у промислових системах накопичення енергії, які застосовуються для компенсації піків навантаження. У багатьох країнах підприємства стикаються з подібною проблемою: короткочасні періоди підвищеного споживання формують непропорційно великі витрати на електроенергію та створюють додаткове навантаження на внутрішні електромережі й обладнання. Саме тому системи накопичення дедалі частіше використовуються не для повного енергозабезпечення, а для згладжування графіків навантаження та зменшення максимальних значень потужності споживання [12]. На теперішній час встановлена потужність накопичувачів енергії в світі становить близько 122 ГВт. Найбільшого поширення вони отримали в США – близько 20% від всієї встановленої потужності накопичувачів в світі.

У міжнародній практиці такі системи зазвичай встановлюють «за лічильником», тобто безпосередньо на стороні споживача. У цьому режимі $LiFePO_4$ акумуляторна система накопичує енергію в періоди стабільного або зниженого навантаження, а під час пікових інтервалів частково бере споживання на себе. Це дозволяє підприємству уникати різких стрибків потужності споживання, не змінюючи технологічний процес. Найчастіше подібні рішення застосовують на об’єктах із потужними електроприводами, компресорними установками, холодильними системами, печами або обладнанням із високими пусковими струмами.

Практика експлуатації показує, що ефективність компенсації піків навантаження значною мірою залежить не лише від ємності акумуляторів, а й від алгоритмів керування. Система повинна враховувати характер виробничого циклу, прогнозувати пікові періоди та раціонально використовувати накопичену

енергію. У цьому контексті $LiFePO_4$ акумулятори добре зарекомендували себе у світі завдяки стабільним електричним параметрам, високому ресурсу циклів і підвищеній термічній безпеці.

Аналізуючи світову практику бачимо, що $LiFePO_4$ акумулятори демонструють надійну й прогнозовану роботу, що підтверджує доцільність їх використання в промислових електромережах для зниження пікових навантажень.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто теоретико-методичні аспекти використання систем накопичення енергії в промислових електромережах. Проаналізовано сучасний стан проблеми пікових навантажень, які призводять до технічних обмежень, підвищених експлуатаційних витрат і зниження надійності електропостачання промислових об’єктів. Узагальнено основні підходи до класифікації систем накопичення електричної енергії та розкрито принципи їхньої роботи з урахуванням особливостей промислового застосування. Окрему увагу приділено технічним характеристикам і перевагам $LiFePO_4$ акумуляторів, що роблять їх використання доцільним для режимів частих циклів заряду та розряду. Також, коротко розглянуто світовий досвід використання таких акумуляторів для компенсації піків навантаження, який підтверджує ефективність цього підходу.

РОЗДІЛ 2
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ $LiFePO_4$ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ

2.1. Загальна характеристика промислового об’єкта електропостачання

Об’єктом проєктування в даній роботі є типовий промисловий споживач електричної енергії (Додаток Б), що характеризується нерівномірним графіком навантаження та наявністю виражених пікових періодів споживання. До таких об’єктів належать виробничі цехи, складські комплекси, підприємства з електроприводним обладнанням, компресорними установками, системами вентиляції, кондиціювання або іншими технологічними процесами з високими пусковими струмами. Електропостачання здійснюється від зовнішньої розподільчої мережі змінного струму з номінальною напругою, прийнятою для промислових споживачів, через власну трансформаторну підстанцію.

Характерною особливістю такого об’єкта є значна різниця між середнім та максимальним значенням споживаної потужності. У нормальному режимі роботи навантаження формується за рахунок базових технологічних процесів, проте у певні часові інтервали відбувається одночасний запуск або інтенсивна робота енергоємного обладнання. Це призводить до короткочасного, але суттєвого зростання активної та реактивної потужності, що створює додаткове навантаження на елементи системи електропостачання. У результаті зростає струмове навантаження на трансформатори, кабельні лінії та комутаційну апаратуру, а також можливі просідання напруги в точках живлення.

Електроприймачі об’єкта за характером роботи можуть належати до різних категорій за надійністю електропостачання, проте навіть для споживачів третьої категорії порушення якості електроенергії негативно впливає на стабільність технологічного процесу. Короткочасні провали напруги, перевантаження або обмеження потужності можуть призводити до аварійних зупинок обладнання, зниження продуктивності та додаткових втрат. Особливо чутливими до таких

явищ є сучасні системи автоматизації, частотно-регульовані приводи та електронні блоки керування.

З економічної точки зору для промислового об’єкта важливим фактором є величина максимальної споживаної потужності, оскільки саме вона часто використовується при формуванні тарифів, умов приєднання та плати за використання мережі. Навіть якщо пікове навантаження триває відносно недовго, воно визначає необхідність резервування відповідної потужності в системі електропостачання. Це створює ситуацію, коли підприємство фактично змушене утримувати інфраструктуру, розраховану на рідкісні максимуми, що є економічно неефективним.

Аналіз режимів роботи об’єкта показує, що пікові навантаження мають прогнозований характер і часто повторюються в одні й ті самі часові проміжки, пов’язані з графіком виробництва. Це створює передумови для впровадження систем накопичення електричної енергії, які можуть працювати у взаємодії з мережею та внутрішнім навантаженням підприємства. Застосування накопичувача дозволяє частково перекласти пікову потужність на автономне джерело, не змінюючи технологічний процес і не знижуючи продуктивність.

Підсумовуючи можемо зазначити, що промисловий об’єкт електропостачання, що розглядається, характеризується наявністю пікових навантажень, високою чутливістю до якості електроенергії та економічною зацікавленістю у зменшенні максимальних значень потужності. Саме ці особливості обґрунтовують доцільність застосування $LiFePO_4$ системи накопичення енергії для компенсації піків навантаження та оптимізації режимів роботи електромережі підприємства.

2.2. Аналіз режимів електроспоживання

Аналіз режимів електроспоживання промислового об’єкта є необхідним етапом для обґрунтування доцільності впровадження системи накопичення електричної енергії та визначення її основних параметрів. Реальні умови роботи підприємства характеризуються нерівномірним навантаженням протягом доби, що обумовлено специфікою технологічних процесів, графіком роботи

обладнання та особливостями організації виробництва. На відміну від побутових споживачів, у промисловості основний вплив на режим електроспоживання мають потужні електроприймачі, робота яких часто супроводжується значними пусковими струмами та короткочасними перевантаженнями.

У типовому робочому режимі електроспоживання підприємства формується базове навантаження, яке відповідає постійно діючим споживачам, таким як системи освітлення, допоміжне обладнання, вентиляція та автоматизовані системи керування. Однак упродовж зміни відбуваються періоди підвищеної активності, пов’язані з одночасним запуском або інтенсивною роботою основного технологічного обладнання. Саме в ці моменти фіксуються пікові значення активної потужності, які значно перевищують середній рівень споживання.

Аналіз добових графіків електроспоживання показує, що пікові навантаження мають чітко виражений часовий характер і, як правило, повторюються з високою регулярністю. Найбільші значення потужності спостерігаються на початку виробничих циклів, під час запуску електродвигунів великої потужності, а також у періоди, коли декілька енергоємних процесів відбуваються одночасно. При цьому тривалість пікових режимів зазвичай є відносно короткою, але їхній вплив на систему електропостачання є суттєвим.

З технічної точки зору пікові режими електроспоживання призводять до зростання струмів у мережі, що викликає додаткові втрати електроенергії та підвищене теплове навантаження на трансформатори й кабельні лінії. У деяких випадках це може спричиняти зниження рівня напруги в точках живлення, що негативно впливає на роботу чутливого обладнання. Повторювані перевантаження також прискорюють зношування елементів електричної мережі та зменшують їхній фактичний ресурс.

Економічний аспект режимів електроспоживання полягає в тому, що саме максимальні значення потужності визначають необхідність резервування відповідної пропускної здатності мережі. Навіть якщо піки тривають нетривалий час, вони формують підвищені витрати на електропостачання та обмежують можливості подальшого розвитку підприємства без модернізації електричної

інфраструктури. У результаті середній рівень споживання може залишатися помірним, але загальні витрати підприємства на електроенергію зростають через нерівномірність навантаження [13, 14].

Проведений аналіз режимів електроспоживання дозволяє зробити висновок, що існує значний потенціал для згладжування пікових навантажень без зміни технологічного процесу. Оскільки піки мають прогнозований характер і обмежену тривалість, їх компенсація може здійснюватися за рахунок системи накопичення енергії, яка працює спільно з мережею. У цьому випадку акумуляторна система заряджається в періоди стабільного або зниженого навантаження, а під час пікових інтервалів частково забезпечує живлення споживачів.

2.3. Вибір стратегії компенсації пікових навантажень

Стратегія компенсації пікових навантажень визначає режим роботи акумуляторів, вимоги до їхньої потужності та ємності, а також загальну ефективність інтеграції накопичувача в систему електропостачання підприємства. Для промислових об’єктів, що характеризуються нерівномірним графіком електроспоживання, основною метою є зменшення максимальних значень споживаної потужності без порушення технологічного процесу та зниження продуктивності обладнання.

На основі аналізу режимів електроспоживання встановлено, що пікові навантаження мають чітко виражений, повторюваний характер і, як правило, обмежену тривалість. У більшості випадків піки виникають у моменти запуску потужних електроприводів, переходу між режимами роботи технологічних ліній або при одночасній роботі кількох енергоємних установок. При цьому середнє значення споживаної потужності залишається значно нижчим за максимальне, що свідчить про наявність резерву для оптимізації графіка навантаження.

З огляду на ці особливості найбільш обґрунтованою є стратегія компенсації пікових навантажень за принципом обмеження максимальної потужності, коли система накопичення енергії залучається лише в ті моменти, коли споживання наближається до встановленого граничного рівня. У такому

режимі акумуляторна система не замінює зовнішнє електропостачання, а працює як допоміжне джерело, що частково покриває пікову складову навантаження. Це дозволяє згладити графік електроспоживання та зменшити вплив короткочасних перевантажень на електричну мережу підприємства.

Особливу роль у реалізації цієї стратегії відіграє вибір типу акумуляторів. $LiFePO_4$ акумулятори є найбільш доцільними для режиму компенсації піків навантаження завдяки поєднанню високої циклічної стійкості, стабільних електричних параметрів та підвищеної термічної безпеки. На відміну від деяких інших літієвих сполук, $LiFePO_4$ добре переносить багаторазові цикли заряду та розряду з відносно невеликою глибиною розряду. У цьому режимі акумулятори можуть виконувати декілька циклів протягом доби без суттєвого зниження ресурсу.

Важливою перевагою $LiFePO_4$ є стабільна напруга розряду в широкому діапазоні стану заряду. Це спрощує роботу інверторного обладнання та дозволяє забезпечувати передбачувану віддачу потужності під час пікових інтервалів. Для промислового об’єкта це означає, що компенсація піку відбувається без різких коливань напруги та без негативного впливу на чутливе електрообладнання. Крім того, здатність $LiFePO_4$ акумуляторів працювати з відносно високими струмами робить їх придатними для короткочасної, але інтенсивної віддачі потужності, що характерно для пікових режимів.

При виборі стратегії компенсації пікових навантажень також враховується можливість гнучкого керування роботою накопичувача. $LiFePO_4$ системи добре поєднуються з сучасними системами керування та дозволяють реалізувати алгоритми, що враховують як поточне навантаження, так і прогноз його зміни. Це дає змогу уникати передчасного розряду акумуляторів і зберігати резерв енергії для дійсно критичних пікових моментів.

З технічної точки зору реалізація такої стратегії сприяє зниженню теплового та струмового навантаження на трансформатори, кабельні лінії та комутаційні апарати. Зменшення пікових струмів позитивно впливає на ресурс обладнання та знижує ймовірність аварійних режимів. З економічної точки зору підприємство отримує можливість зменшити витрати, пов’язані з високими

максимальними значеннями потужності, а також відтермінувати необхідність модернізації системи електропостачання [15].

Загалом, стратегія компенсації пікових навантажень із застосуванням $LiFePO_4$ систем накопичення енергії є технічно обґрунтованим та економічно ефективним рішенням для промислового об’єкта. Вона дозволяє оптимізувати режими електроспоживання, знизити пікові навантаження та забезпечити стабільну роботу електромережі без зміни основних параметрів технологічного процесу.

2.4. Розрахунок параметрів акумуляторної системи $LiFePO_4$ та вибір схеми підключення

Після аналізу добового графіка електроспоживання та вибору стратегії обмеження пікової потужності наступним кроком є визначення параметрів акумуляторної системи на базі $LiFePO_4$ і вибір схеми її підключення до електромережі підприємства. У промислових умовах система накопичення енергії зазвичай працює «за лічильником», тобто на стороні споживача, і не замінює зовнішнє електропостачання, а короткочасно підхоплює навантаження, коли споживання перевищує заданий поріг. Такий режим називають зрізання піків, він дає ефект навіть при відносно невеликій енергоємності, якщо піки короткі та повторювані (що характерно для запусків потужних електроприводів, компресорів, технологічних ліній тощо). Підходи до розрахунку в цьому випадку зводяться до двох ключових величин: потужність, яку треба віддати в пік, і енергія, яку треба віддати за тривалість піку.

Потужність, яку повинна забезпечувати система накопичення в піковий період, визначається як різниця між фактичною максимальною потужністю та допустимим граничним рівнем (2.1):

$$P = P_{max} - P_{lim}, \quad (2.1)$$

де P – потужність системи накопичення, кВт;

P_{max} – максимальна активна потужність підприємства, кВт;

P_{lim} – встановлений граничний рівень потужності, кВт;

На практиці доцільно закладати невеликий запас (5–15%) через нерівномірність піка та похибки вимірювань, але надмірний запас невигідний: він збільшує вартість інвертора і батарейної частини. Окремо важливо розуміти, що не завжди потрібна 100% компенсація. Часто достатньо «зрізати» верхню частину піка, щоб отримати відчутний ефект для трансформатора, кабельних ліній і тарифної складової. Саме тому зазвичай домінує вимога до потужності, а енергоємність підбирається під тривалість піка.

Необхідна енергія визначається добутком потужності компенсації на час, протягом якого пік триває (2.2):

$$W = P \cdot t, \qquad (2.2)$$

де P – потужність системи накопичення, кВт;

W – енергія, кВт*год;

t – час, год.

Під час розрахунку ємності акумуляторної системи важливо враховувати, що реальна експлуатація $LiFePO_4$ батарей не передбачає використання 100% їхньої номінальної енергії. Повний розряд суттєво скорочує ресурс і збільшує деградацію комірок. Тому в технічних розрахунках застосовують поняття допустимої глибини розряду (DOD), яка для $LiFePO_4$ зазвичай становить 0,7–0,8. Це означає, що встановлена енергоємність повинна бути більшою за необхідну робочу енергію (2.3).

$$W_{ном} = \frac{W}{DOD}, \qquad (2.3)$$

де $W_{ном}$ – встановлена (номінальна) енергоємність батареї, кВт·год;

W – необхідна робоча енергія, кВт·год;

DOD – допустима глибина розряду (частка від 1).

Енергетичні характеристики батарейної системи безпосередньо пов’язані з її напругою постійного струму та електричною ємністю. У розрахунках

застосовується базове співвідношення для джерела постійного струму, яке дозволяє визначити загальну енергію батарейного масиву. Це співвідношення використовується при підборі конфігурації послідовно-паралельного з'єднання модулів. Звідси необхідна ємність батарейного масиву визначається як (2.4):

$$C = \frac{W}{U}, \qquad (2.4)$$

де W – енергія батареї, Вт·год;

U – номінальна напруга постійного струму, В;

C – ємність батареї, А·год.

Для правильного вибору кабелів, шин та апаратів захисту необхідно визначити струм на стороні постійного струму батарейної системи. Основою розрахунку є базове співвідношення між напругою, струмом і потужністю для постійного струму. У реальній системі також враховується коефіцієнт корисної дії інвертора (2.5).

$$I = \frac{P}{U \cdot \eta}, \qquad (2.5)$$

де P – потужність постійного струму, Вт;

U – напруга батарейної шини, В;

I – струм батареї, А;

η – коефіцієнт корисної дії інвертора.

Оскільки система накопичення підключається до трифазної мережі 0,4 кВ, необхідно визначити струми на стороні змінного струму. Для цього використовується класична формула активної потужності трифазної системи. Вона дозволяє перейти від заданої потужності до лінійного струму інвертора (2.6).

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi}, \qquad (2.6)$$

де P – активна потужність, кВт;

U – лінійна напруга, кВ;

I – лінійний струм, кА;

cosφ – коефіцієнт потужності.

При виборі інвертора необхідно враховувати не лише активну, а й повну потужність (2.7), оскільки обладнання підбирається саме за значенням повної потужності. Це дозволяє забезпечити роботу системи без перевантажень у режимах змінного коефіцієнта потужності.

$$S = \frac{P}{\cos \varphi}, \qquad (2.7)$$

де S – повна потужність інвертора, кВА;

P – активна потужність, кВт;

cosφ – коефіцієнт потужності.

Для забезпечення готовності системи до наступного пікового інтервалу необхідно визначити середню потужність заряду в міжпіковий період. Розрахунок виконується як відношення встановленої енергоємності до тривалості доступного часу заряду (2.8).

$$P_{сер} = \frac{W}{t}, \qquad (2.8)$$

де $P_{сер}$ – середня потужність заряду, кВт;

W – встановлена енергоємність батареї, кВт·год;

t – тривалість міжпікового інтервалу, год.

Для даної роботи найбільш раціональною є схема підключення інвертора на шині 0,4 кВ головного розподільчого щита підприємства. Такий варіант дозволяє впливати на загальну споживану потужність у точці приєднання до мережі (Додаток В).

Підключення здійснюється окремим фідером через автоматичний вимикач із можливістю аварійного відключення. На стороні постійного струму передбачаються запобіжники та роз'єднувачі. Система керування забезпечує автоматичне включення накопичувача при досягненні встановленого порогу потужності.

Таким чином, за результатами розрахунків визначено:

- потужність компенсації – 150 кВт;
- встановлена енергоємність – 46,9 кВт·год;
- напруга батарейної шини – 512 В;
- ємність батарейного масиву – 92 А·год;
- повна потужність інвертора – 153 кВА.

Отримані значення узгоджуються з режимами роботи промислової мережі та забезпечують технічно обґрунтовану інтеграцію $LiFePO_4$ системи накопичення.

2.5. Вплив системи накопичення на режим роботи мережі

Основною функцією системи накопичення (Додаток Г) у даній роботі є компенсація пікових навантажень. Це означає, що в моменти перевищення заданого рівня потужності частина споживання підприємства покривається за рахунок батарей, а не від зовнішньої мережі. Таким чином, максимальна потужність у точці приєднання зменшується, що позитивно впливає на режим роботи всіх елементів електропостачання.

Зменшення активної потужності без зміни напруги та коефіцієнта потужності призводить до пропорційного зменшення струму. Якщо, наприклад, система накопичення компенсує 150 кВт пікової потужності, то відповідно зменшується струм, який проходить через трансформатор і кабельні лінії. Зменшення струму навіть на 10-20% може суттєво вплинути на тепловий режим провідників і силового обладнання. Це особливо важливо для мереж, які працюють поблизу допустимих струмових навантажень.

Зменшення пікової активної потужності призводить до зменшення повної

потужності та відповідно коефіцієнта завантаження. Це особливо важливо для підприємств, де трансформатор працює з коефіцієнтом завантаження понад 0,8-0,9. Зниження завантаження навіть на 5-10% дозволяє зменшити теплове старіння ізоляції обмоток. Відомо, що термін служби трансформатора значною мірою залежить від температури його активної частини. Таким чином, система накопичення опосередковано продовжує ресурс трансформатора.

Зменшення струму під час пікових режимів призводить до зменшення падіння напруги. Це означає, що напруга на шинах розподільчого щита стає стабільнішою. Для електроприводів та чутливого обладнання це є позитивним фактором, оскільки зменшується ризик просідання напруги під час запуску потужних агрегатів. У промислових мережах стабільність напруги впливає на якість технологічного процесу, особливо якщо використовується електронне або частотно-регульоване обладнання.

Пускові струми електродвигунів можуть у декілька разів перевищувати номінальні значення. Якщо система накопичення підключена на шинах 0,4 кВ і працює в режимі швидкого реагування, вона частково компенсує стрибок потужності в момент пуску. У результаті зменшується миттєве навантаження на трансформатор та кабелі. Система накопичення не збільшує струм суттєво, якщо інвертор має вбудовані обмеження струму. Тому при правильному налаштуванні захистів негативний вплив на аварійні режими відсутній.

У більшості сучасних інверторів реалізована можливість регулювання коефіцієнта потужності. Це дозволяє частково компенсувати реактивну складову навантаження. Якщо інвертор працює з заданим cosφ, система накопичення може покращувати загальний коефіцієнт потужності підприємства. Це зменшує повну потужність у точці приєднання та сприяє зниженню струмів.

Окремо слід відзначити, що система накопичення працює у динамічному режимі. Її вплив на мережу змінюється залежно від стану заряду та графіка навантаження. У міжпіковий період заряд створює додаткове навантаження, тому важливо, щоб алгоритм керування забезпечував рівномірний заряд без створення нових пікових перевищень.

Підсумовуючи проведений аналіз, можна зазначити, що впровадження $LiFePO_4$ системи накопичення позитивно впливає на режим роботи електричної мережі підприємства за умови правильного проєктування та налаштування. Основні результати впливу полягають у:

– зменшенні пікових струмів;
– зниженні втрат потужності;
– стабілізації рівня напруги;
– зменшенні теплового навантаження на трансформатор;
– покращенні коефіцієнта потужності;
– зниженні ризику перевантажень.

Таким чином, система накопичення виступає не лише як інструмент економічної оптимізації, а й як засіб підвищення надійності та довговічності електроенергетичної інфраструктури підприємства.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі було показано, що для промислового споживача важливою проблемою є не середній рівень електроспоживання, а різке збільшення навантаження. Саме це впливає на якість електроенергії в робочих точках. Тому пошук рішення зводиться до того, щоб зменшити амплітуду піків без втручання у технологічний процес.

На основі аналізу режимів електроспоживання обґрунтовано доцільність застосування системи накопичення енергії як інструменту вирівнювання графіка навантаження. Вибрана стратегія компенсації полягає у тому, що накопичувач працює лише тоді, коли підприємство наближається до граничної потужності, а в інший час відновлює запас енергії у «спокійні» години. Такий підхід є практичним для виробничих умов, де піки повторюються та мають обмежену тривалість.

Визначення потрібної потужності та енергоємності, а також врахування допустимої глибини розряду і ККД перетворювачів показало, що навіть порівняно компактний накопичувач може ефективно стабілізувати пікові навантаження. Оцінка впливу накопичувача на режим мережі підтвердила, що

ефект проявляється не лише в зниженні пікової потужності. У мережі зменшуються струми, а отже й втрати та теплове навантаження на елементи електропостачання, стабілізується напруга під час динамічних режимів, зокрема пусків електродвигунів, покращуються умови роботи трансформатора через зменшення завантаження у критичні моменти. Водночас підкреслено, що позитивний результат залежить від коректного алгоритму керування зарядом/розрядом і від узгодження роботи інвертора із системою захистів підприємства.

Загалом, у розділі сформовано технічне обґрунтування інтеграції $LiFePO_4$ системи в схему електропостачання промислового об’єкта та показано, що накопичувач може бути не додатковим обладнанням, а елементом, який реально впливає на стабільність режимів, ресурс мережевої інфраструктури й умови подальшого розвитку підприємства.

РОЗДІЛ 3
ІНЖИНІРИНГОВЕ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

3.1. Аналіз етапів інжинірингу промислової системи накопичення

Інжинірингове проєктування промислової системи накопичення енергії являє собою комплексне технічне рішення, інтегроване у реальну електроенергетичну систему підприємства. У промисловості будь-яке енергетичне рішення оцінюють не лише за паспортними характеристиками, а за здатністю стабільно функціонувати в конкретних сценаріях, не створювати нових ризиків і залишатися керованим у реальних умовах – з пусковими струмами, перехідними процесами, коливанням навантаження, змінами режимів протягом доби та обмеженнями існуючої інфраструктури.

Проєктування системи накопичення для промислового об’єкта зазвичай починається з уточнення вихідних умов та постановки задачі, яка має бути сформульована у вимірюваних показниках [16]. Для компенсації піків навантаження це означає визначення цільового рівня обмеження максимальної потужності в точці приєднання, допустимої тривалості підтримки та критеріїв оцінки результату. Такими критеріями можуть бути зменшення добового максимуму, скорочення кількості перевищень договірної потужності, зниження провалів напруги в моменти запуску обладнання, стабілізація температурного режиму трансформатора чи кабельних ліній. Уже на цьому етапі закладається логіка керування: накопичувач або підхоплює навантаження при досягненні певного порогу, або працює за прогнозною моделлю, або комбінує обидва підходи. Для підприємства принципово важливо, щоб система не розряджалася завчасно і зберігала резерв енергії для дійсно критичних моментів, тому постановка задачі фактично визначає рамки для майбутніх алгоритмів EMS і контролера.

Після визначення цілей інжиніринг переходить до енергетичного та електротехнічного обстеження об’єкта. Система накопичення не існує окремо від мережі, вона працює в її структурі, тому необхідно проаналізувати схему

електропостачання, рівні напруги, конфігурацію шин, тип трансформаторної підстанції, характер навантажень, а також наявність частотно-регульованих приводів, перетворювачів та іншого силового обладнання. Далі визначається оптимальна точка підключення. Підключення ближче до вводу дозволяє впливати на максимум у точці приєднання, тоді як локальне підключення до певної групи навантажень може зменшити вплив пускових струмів на внутрішні мережі. Це рішення безпосередньо впливає на вибір потужності перетворювача, номінали струмів, тип комутаційної апаратури та налаштування захистів.

Наступним кроком є детальний аналіз графіка навантаження, на якому важливо розуміти не лише максимальне значення потужності, а форму пікового навантаження. Короткочасні імпульсні піки потребують високої потужності розряду при відносно невеликій ємності, тоді як тривалі пікові інтервали потребують більшої енергоємності. Саме тут проявляється інженерна різниця між потужністю та енергією. У випадку $LiFePO_4$ це означає коректний підбір конфігурації батарейних модулів і допустимих струмів у поєднанні з інвертором (Додаток Д). Важливо забезпечити такий режим, при якому батарея працює у передбачуваному діапазоні стану заряду, не досягаючи граничних режимів щодня. Це дозволяє зберегти ресурс та забезпечити стабільність параметрів протягом тривалого періоду експлуатації [17].

Після енергетичного аналізу формується архітектура системи. Промислова система накопичення включає батарейні модулі постійного струму, силовий перетворювач, систему керування та захисту, а також допоміжну інфраструктуру. Модульна структура дозволяє масштабувати систему та спрощує технічне обслуговування. Перетворювач забезпечує двонапрямний обмін енергією між мережею та батареєю, а BMS контролює стан комірок, температуру та балансування. Інтеграція з автоматикою підприємства дає змогу синхронізувати роботу накопичувача з виробничими режимами.

Особливу увагу приділяють проєктуванню електричної схеми та системи захистів. Додавання накопичувача змінює умови аварійних режимів, тому необхідно забезпечити селективність відключень, захист від коротких замикань і правильне заземлення. Силова електроніка має іншу поведінку під час

короткого замикання порівняно з класичними джерелами живлення, тому перевірка розрахунків є обов’язковою. Водночас важливо, щоб робота перетворювача не погіршувала якість електроенергії та не створювала небажаних ситуацій.

Паралельно розробляються рішення щодо розміщення обладнання. Батарейні шафи потребують відповідних умов мікроклімату, вентиляції або кондиціювання, достатнього простору для обслуговування та дотримання вимог пожежної безпеки. Навіть при високій термічній стабільності $LiFePO_4$ необхідно забезпечити контроль температури та обмежити вплив пилу й вологи. На цьому етапі враховується також зручність подальшого сервісу та можливість швидкого аварійного відключення.

Перед введенням у експлуатацію проводиться перевірка розрахункових параметрів і тестування системи в різних сценаріях. Перевіряється реакція на перевищення порогового значення потужності, робота в режимі заряду в міжпікові години, а також поведінка при повторних циклах. Це дозволяє скоригувати налаштування та переконатися у стабільності роботи.

Монтаж і введення в експлуатацію завершують інжиніринговий цикл. На цьому етапі перевіряється якість з’єднань, відповідність схем і коректність налаштувань. Система повинна продемонструвати здатність знижувати пікову потужність без порушення технологічного процесу підприємства.

Завершальною стадією інжинірингу є організація експлуатації. На цьому етапі розробляються регламенти обслуговування, визначається порядок моніторингу параметрів і підготовка персоналу. Регулярний контроль температури, напруги комірок і стану контактів дозволяє підтримувати стабільність системи та зберігати її ефективність протягом усього терміну служби.

Таким чином, інжиніринг промислової системи накопичення енергії є комплексним процесом, що поєднує технічний аналіз, проєктування, інтеграцію та організацію експлуатації. Саме системний підхід дозволяє перетворити теоретичну можливість компенсації піків навантаження на реальний інструмент підвищення надійності та енергоефективності підприємства.

3.2. Дослідження структурної схеми електроенергетичної системи

Дослідження структурної схеми електроенергетичної системи промислового об’єкта є необхідним етапом перед остаточним вибором параметрів і конфігурації системи накопичення енергії. На цьому етапі варто зосередити увагу на аналізі існуючої електричної структури підприємства та її взаємодії з майбутньою $LiFePO_4$ системою. Практика показує, що ефективність компенсації пікових навантажень значною мірою залежить не лише від характеристик акумуляторів, а від правильного розуміння топології мережі, режимів роботи трансформаторів, характеру навантажень і організації внутрішнього електропостачання.

Щоб оцінити навантаження та струми у вузлах схеми, у трифазній мережі використовують співвідношення між активною потужністю, напругою та струмом (3.1):

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi, \qquad (3.1)$$

де P – активна потужність, кВт

U – лінійна напруга, кВ

I – лінійний струм, кА

cosφ – коефіцієнт потужності

Типова структурна схема електроенергетичної системи промислового об’єкта включає зовнішнє приєднання до розподільчої мережі середньої напруги, власну трансформаторну підстанцію, розподільчі пристрої низької напруги та групи електроприймачів різного призначення. У більшості випадків електроживлення здійснюється від мережі 6-10 кВ з пониженням напруги до 0,4 кВ через силовий трансформатор [18]. Саме на цьому рівні формується основна частина внутрішніх навантажень підприємства, а також виникають пікові струми під час запуску обладнання. Структурний аналіз дозволяє оцінити, де саме в цій схемі доцільно інтегрувати систему накопичення, щоб вона впливала на максимум споживаної потужності, не створюючи додаткових ризиків.

Для практичних розрахунків у вузлах 0,4 кВ часто потрібно перейти від активної потужності до струму, тому вираз перетворюють (3.2):

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} \qquad (3.2)$$

Першим аспектом дослідження є оцінка параметрів ввідної частини системи. До неї належать кабельні або повітряні лінії, комутаційні апарати та захисні пристрої на стороні середньої напруги. Важливо визначити допустимі струми, короткочасні перевантаження, а також розрахункову потужність, на яку розрахована точка приєднання. Оскільки стратегія компенсації піків навантаження спрямована на зменшення максимального значення потужності в цій точці, структурна схема повинна чітко показувати, яким чином електроенергія надходить до підприємства та як вона розподіляється далі. Це дозволяє зрозуміти, чи доцільно підключати накопичувач безпосередньо на шині низької напруги головного розподільчого пристрою або реалізувати локальну компенсацію на окремій групі навантажень.

Для оцінки «плати за максимум» та впливу піків у технічній частині зазвичай фіксують максимальну активну потужність і порівнюють її з допустимою. Величину, яку має перекрити накопичувач задають різницею (3.3):

$$P_{ES} = P_{max} - P_{lim}, \qquad (3.3)$$

де P_{ES} – потужність, яку в піку віддає система накопичення, кВт;

P_{max} – фактичний максимум, кВт;

P_{lim} – граничне значення, кВт.

Другим важливим елементом структурної схеми є трансформаторна підстанція. Силовий трансформатор виконує не лише функцію перетворення напруги, а й є одним із найбільш чутливих елементів до перевантажень. У періоди пікового навантаження саме він зазнає підвищеного теплового впливу. Дослідження його номінальної потужності, коефіцієнта завантаження, умов

охолодження та режимів роботи дозволяє оцінити потенційний ефект від впровадження накопичувача. Якщо піки навантаження наближаються до граничних значень допустимого струму, система накопичення може виконувати роль інструмента для зменшення теплового навантаження на трансформатор і продовження його ресурсу.

Оцінюючи роботу трансформатора переходять до повної потужності (3.4) та коефіцієнта завантаження (3.5):

$$S = \frac{P}{\cos\varphi}, \tag{3.4}$$

де S – повна потужність, кВА;

P – активна потужність, кВт;

cosφ – коефіцієнт потужності.

$$k_з = \frac{S_ф}{S_н}, \tag{3.5}$$

де $k_з$ – коефіцієнт завантаження;

$S_ф$ – фактична повна потужність, кВА;

$S_н$ – номінальна потужність трансформатора, кВА.

Наступним етапом є аналіз розподільчої частини схеми. Головний розподільчий щит низької напруги об’єднує декілька фідерів, кожен з яких живить окрему групу споживачів. Структурне дослідження повинно визначити, які з цих груп формують основну частину пікової потужності. У більшості випадків це електроприводи великої потужності, компресорні установки, печі або холодильне обладнання. Оскільки піки можуть виникати внаслідок одночасного запуску декількох агрегатів, важливо проаналізувати часову структуру їх роботи. У цьому контексті структурна схема не є лише графічним зображенням зв’язків між елементами, а виступає основою для розуміння логіки розподілу енергії всередині підприємства.

Для оцінки втрат на фідерах і в кабельних лініях у режимах підвищених струмів застосовують формулу активних втрат у трифазній лінії (3.6):

$$\Delta P = 3I^2R, \qquad (3.6)$$

де ΔP – втрати активної потужності, Вт;

I – струм фази, А;

R – активний опір провідника однієї фази, Ом.

Якщо говорити про характеру навантажень, то електроприймачі можуть бути активними, реактивними або нелінійними. Наявність частотно-регульованих приводів, випрямлячів та імпульсних джерел живлення змінює структуру струмів у мережі та впливає на якість електроенергії. Дослідження гармонічного складу струмів дозволяє оцінити, чи не буде силовий перетворювач накопичувача додатково впливати на показники якості напруги. У промислових умовах важливо забезпечити, щоб інтеграція $LiFePO_4$ системи не призвела до небажаних резонансних явищ або перевантаження нейтрального провідника.

Щоб відокремлено оцінити реактивну складову (і, відповідно, вплив на струми), застосовують співвідношення (3.7):

$$Q = P \tan \varphi, \qquad (3.7)$$

де Q – реактивна потужність, кВАр;

P – активна потужність, кВт;

tanφ – тангенс кута зсуву фаз.

Структурна схема також повинна враховувати систему захисту та автоматики. Додавання накопичувача фактично створює додаткове джерело живлення у мережі підприємства. Це означає, що в аварійному режимі можлива зміна напрямку струму, а отже, необхідно забезпечити коректну роботу релейного захисту. Аналіз структурної схеми дозволяє визначити, які апарати повинні бути модернізовані або переналаштовані, щоб зберегти селективність

відключень і запобігти небажаним сценаріям, коли при аварії система накопичення продовжує живити пошкоджену ділянку.

Для орієнтовної оцінки аварійних струмів (потрібно для перевірки апаратів захисту) використовують загальну формулу (3.8):

$$I_{кз} = \frac{U}{Z_{\Sigma}}, \qquad (3.7)$$

де $I_{кз}$ – струм короткого замикання, А;

U – напруга в точці КЗ, В;

Z_{Σ} – сумарний повний опір кола короткого замикання, Ом.

Важливим елементом дослідження є визначення точки інтеграції системи накопичення. Для задач компенсації піків навантаження найбільш доцільним є підключення на шині низької напруги головного розподільчого пристрою. Такий варіант дозволяє зменшити потужність у точці приєднання до мережі та впливати на загальний графік споживання підприємства. Водночас у деяких випадках доцільною є локальна компенсація на окремій лінії, якщо піки формуються конкретним агрегатом. Структурне дослідження дозволяє обґрунтувати вибір, виходячи з конфігурації мережі та розташування навантажень.

Оскільки інтеграція виконується на шинах 0,4 кВ, важливо оцінити можливі відхилення напруги на ділянках живлення. Для наближеного розрахунку падіння напруги на лінії застосовують формулу (3.8):

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cos\varphi + X \sin\varphi), \qquad (3.8)$$

де ΔU – падіння напруги, В;

I – струм, А;

cosφ, sinφ – параметри режиму навантаження;

R – активний опір лінії;

X – реактивний опір.

Окрім електричних аспектів, структурна схема враховує фізичне розміщення обладнання. Батарейні шафи, інвертор, комутаційні апарати та системи охолодження повинні бути інтегровані в існуючу інфраструктуру без порушення вимог безпеки. Аналіз просторової організації приміщень дозволяє оцінити довжину кабельних ліній постійного та змінного струму, що впливає на втрати та рівень напруги [19].

Структурна схема розглядається не як статична модель, а як система, що працює в динамічному режимі. Пікові навантаження виникають у конкретні часові інтервали, тому дослідження повинно враховувати добові та змінні цикли роботи підприємства. Визначення повторюваності піків дозволяє адаптувати алгоритм керування накопичувачем і забезпечити раціональне використання його ємності.

Загалом можна сказати, що дослідження структурної схеми електроенергетичної системи є головним етапом перед впровадженням $LiFePO_4$ системи накопичення енергії. Воно дозволяє оцінити взаємозв'язки між елементами мережі, визначити оптимальну точку інтеграції, забезпечити коректну роботу захистів і мінімізувати технічні ризики. Саме на основі такого аналізу можна перейти до розробки технічних рішень і виконання розрахунків параметрів системи.

3.3. Проєктування технічних рішень для ефективного накопичення енергії на базі $LiFePO_4$ акумуляторів

Проєктування технічних рішень для системи накопичення енергії на базі $LiFePO_4$ акумуляторів є логічним продовженням попередніх етапів дослідження, де було обґрунтовано доцільність компенсації пікових навантажень та проаналізовано структурну схему електроенергетичної системи підприємства. Якщо раніше увага приділялася загальній логіці інтеграції та вибору стратегії, то на цьому етапі необхідно перейти до конкретних технічних рішень, які забезпечують реальну працездатність і ефективність системи. Йдеться не лише про підбір акумуляторів, а про створення збалансованої конфігурації, в якій

кожен елемент, батарея, інвертор, система керування, захисти та допоміжна інфраструктура, працює узгоджено і в межах допустимих режимів.

Першим кроком у проєктуванні є визначення розрахункової потужності системи накопичення. Вихідними даними слугують результати аналізу режимів електроспоживання та встановлений цільовий рівень обмеження максимальної потужності. Якщо, наприклад, пікове навантаження підприємства перевищує середній рівень на 20-30%, то накопичувач повинен покривати саме цю пікову складову. Розрахункову потужність накопичувача розраховують за формулою 3.3. Водночас важливо врахувати, що компенсація не обов'язково має бути повною. Практика показує, що навіть часткове згладжування піків дає відчутний економічний ефект і знижує навантаження на трансформатор та кабельні лінії.

Після визначення потужності переходять до розрахунку необхідної енергоємності. Вона залежить від тривалості пікового навантаження. Якщо пік триває 10-15 хвилин, енергоємність може бути відносно невеликою. Якщо ж пікові інтервали повторюються протягом години, система повинна мати достатній запас енергії для стабільної роботи. Енергія, яку має віддати система, визначається за формулою (3.9):

$$W = P_{нак} \cdot t \qquad (3.9)$$

де W – необхідна енергія, кВт·год;

$P_{нак}$ – потужність системи накопичення, яка віддається в мережу під час пікового навантаження, кВт;

t – тривалість пікового навантаження, год.

Для $LiFePO_4$ акумуляторів важливо врахувати робочий діапазон стану заряду. Щоб зберегти ресурс, небажано регулярно використовувати повний діапазон від 0 до 100%. Тому проєктна ємність визначається за формулою 3.10 з урахуванням допустимої глибини розряду, зазвичай у межах 70-80%. Це означає, що фактична встановлена ємність повинна бути більшою за розрахункову потребу, щоб забезпечити роботу в оптимальному режимі.

$$W_{вст} = \frac{W}{DOD}, \quad (3.10)$$

де $W_{вст}$ – встановлена енергоємність батареї, кВт·год;

DOD – допустима глибина розряду (для $LiFePO_4$ зазвичай 0,7-0,8).

Наступним етапом є вибір конфігурації батарейних модулів. Енергія акумуляторної батареї визначається через напругу постійного струму та ємність (3.11):

$$W_{вст} = U_{DC} \cdot C, \quad (3.11)$$

де U_{DC} – номінальна напруга батарейної шини, В;

С – ємність батареї, А·год.

Звідси ємність батарейного масиву (3.12):

$$C = \frac{W_{вст}}{U_{DC}} \quad (3.12)$$

Оскільки система працює через інвертор (Додаток Ґ), необхідно визначити струми на стороні змінного струму. Для трифазної мережі 0,4 кВ струм визначається за формулою 3.2.

Для промислових систем зазвичай використовується послідовно-паралельне з’єднання елементів для досягнення необхідної напруги постійного струму та загальної ємності. При цьому враховується сумісність з інвертором, який має працювати в певному діапазоні вхідної напруги. Оптимальний вибір напруги батарейної шини дозволяє зменшити струми та відповідно втрати в провідниках.

Окрему увагу приділяють вибору силового перетворювача. Інвертор у системі накопичення виконує дві функції: перетворення постійного струму батареї в змінний струм мережі та зворотний процес під час заряду. Його номінальна потужність повинна відповідати розрахунковій потужності

компенсації піків із певним запасом. Повна потужність інвертора розраховується за формулою (3.13)

$$S = \frac{P_{нак}}{\cos \varphi}, \qquad (3.13)$$

де S – повна потужність, кВА;

$P_{нак}$ – потужність системи накопичення, яка віддається в мережу під час пікового навантаження, кВт;

Важливо врахувати ККД, допустимі перевантаження та можливість роботи в динамічному режимі. Для компенсації піків критичною є швидкодія інвертора. Він повинен реагувати на перевищення порогу потужності практично миттєво, щоб згладжування відбувалося без затримок і не супроводжувалося провалами напруги.

Наступним технічним рішенням є інтеграція системи керування. BMS забезпечує контроль напруги окремих комірок, температури та балансування. Однак для ефективної компенсації піків цього недостатньо. Потрібна система енергоменеджменту, яка аналізує поточне навантаження підприємства і визначає момент підключення накопичувача. Потрібно передбачити алгоритм, що активує розряд при досягненні встановленого порогового значення активної потужності. Додатково може використовуватися прогнозування на основі історичних даних, що дозволяє підготувати систему до очікуваного піку.

Важливою складовою технічного рішення є забезпечення електричної безпеки та надійності. Для цього передбачаються автоматичні вимикачі постійного та змінного струму, захисти від короткого замикання, перенапруги та перевищення температури. У системі повинна бути реалізована можливість аварійного відключення як на стороні змінного, так і на стороні постійного струму. Заземлення батарейних шаф і перетворювача виконується відповідно до вимог електробезпеки, що дозволяє мінімізувати ризик ураження персоналу.

Не менш важливим є тепловий режим роботи системи. Хоча $LiFePO_4$ акумулятори відзначаються високою термічною стабільністю, їх ресурс значною

мірою залежить від температури. Проєктування передбачає організацію вентиляції або кондиціювання приміщення, де встановлюються батарейні шафи. Визначається допустимий діапазон температури, а також умови відведення тепла від інвертора. Розрахунок тепловиділення дозволяє оцінити необхідну продуктивність системи охолодження.

Під час проєктування враховують і питання просторового розміщення. Батарейні модулі повинні бути встановлені з урахуванням доступу для обслуговування, можливості заміни та дотримання протипожежних відстаней. Кабельні траси прокладаються з мінімізацією довжини для зниження втрат і забезпечення механічного захисту.

Окремим аспектом є оптимізація режимів заряду. Для системи компенсації піків заряд відбувається в міжпікові періоди, коли навантаження підприємства є нижчим. Це дозволяє не лише зберігати резерв для наступного піку, а й оптимізувати використання тарифних зон. Алгоритм повинен забезпечувати поступовий заряд без різких струмових стрибків, щоб не створювати нових піків. Середня потужність заряду визначається як (3.14):

$$P_{\text{зар}} = \frac{W_{\text{вст}}}{t_{\text{зар}}}, \qquad (3.14)$$

де $W_{вст}$ – встановлена енергоємність батареї, кВт·год;

$t_{зар}$ – тривалість міжпікового інтервалу.

Важливим етапом є моделювання роботи системи. За допомогою розрахункових моделей можна оцінити вплив накопичувача на графік навантаження, трансформатор та кабельні лінії. Моделювання дозволяє перевірити різні сценарії – від типового робочого дня до аварійних режимів. Це дає можливість скоригувати параметри до введення системи в експлуатацію.

Після завершення технічного проєктування формується комплект документації, що включає електричні схеми, специфікацію обладнання, опис алгоритмів керування та вимоги до монтажу. У документації фіксуються

розрахункові параметри, що дозволяє у подальшому контролювати відповідність фактичної роботи системи проєктним рішенням [20].

Для узагальнення результатів розрахунків за формулами 3.1-3.14 та переходу до побудови структурної схеми електропостачання (Додаток Е) зводимо ключові параметри в одну підсумкову таблицю 3.1, де вказуємо прийняті вихідні дані та розраховані величини, які визначають режими роботи вузла 0,4 кВ, завантаження трансформатора та вимоги до $LiFePO_4$ системи накопичення й інвертора.

Таблиця 3.1

Розрахункові параметри для побудови структурної схеми та вибору $LiFePO_4$ системи

Параметр	**Значення**
Лінійна напруга мережі НН, U	0,4 кВ
Коефіцієнт потужності навантаження, cosφ	0,90
Максимальна активна потужність, P_{max}	800 кВт
Гранична активна потужність, P_{lim}	650 кВт
Потужність компенсації ESS, PES	150 кВт
Струм у піку (0,4 кВ), I_{max}	1283 А
Струм при обмеженні, I_{lim}	1043 А
Різниця струму, яку “знімає” ESS, ΔI	240 А
Повна потужність у піку, S_{max}	889 кВА
Номінальна потужність трансформатора, S_n	1000 кВА
Коефіцієнт завантаження трансформатора, k_z	0,9
Реактивна потужність у піку, Q_{max}	387 кВАр
Активний опір фази ділянки, R	0,0010 Ом
Реактивний опір фази ділянки, X	0,0008 Ом
Втрати потужності у піку на ділянці, ΔP_{max}	4,94 кВт
Падіння напруги у піку, ΔU_{max}	2,77 В
Відносне падіння напруги, δU	0,69 %
Сумарний опір петлі КЗ (прийнято), Z_Σ	0,020 Ом
Орієнтовний струм КЗ, $I_{кз}$	20 кА
Тривалість піку, t	0,25 год (15 хв)
Енергія, яку має віддати ESS за пік, W	37,5 кВт·год
Допустима глибина розряду $LiFePO_4$, DOD	0,80
Встановлена енергоємність батареї, $W_{вст}$	46,9 кВт·год
Номінальна DC-напруга батарейної шини, UDC	512 В
Ємність батарейного масиву, C	91,6 А·год
Коефіцієнт потужності інвертора, $\cos\varphi_{inv}$	0,98
Повна потужність інвертора, S_{inv}	153,1 кВА
Тривалість міжпікового інтервалу заряду, $t_{зар}$	2,0 год
Середня потужність заряду, $P_{зар}$	23,4 кВт

Отримані розрахункові значення в таблиці 3.1 показують, що для обмеження пікового навантаження з 800 до 650 кВт необхідно передбачити систему накопичення з потужністю близько 150 кВт та встановленою енергоємністю орієнтовно 46,9 кВт·год (з урахуванням DOD = 0,8). За цих умов інвертор доцільно підбирати за повною потужністю не менше 153 кВА, а робочі струми на шині 0,4 кВ зменшуються приблизно на 240 А у піковому режимі. Це створює основу для обґрунтованого вибору точки підключення ESS, номіналів апаратів захисту та параметрів кабельних ліній при побудові структурної схеми.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано поетапне інжинірингове опрацювання системи накопичення електричної енергії на базі $LiFePO_4$ акумуляторів для промислового об’єкта. На першому етапі проведено дослідження структурної схеми електроенергетичної системи підприємства з урахуванням особливостей підключення до мережі 6-10 кВ, параметрів силового трансформатора та режимів роботи розподільчих пристроїв 0,4 кВ. Використання розрахункових співвідношень для визначення струмів, повної потужності, коефіцієнта завантаження трансформатора, втрат у лініях та падіння напруги дозволило кількісно оцінити вплив пікових навантажень на елементи системи електропостачання.

Обґрунтовано технічні рішення щодо вибору потужності та енергоємності накопичувача, параметрів батарейної шини постійного струму, ємності акумуляторного масиву та повної потужності інвертора. Розраховано необхідну енергію для компенсації пікового інтервалу з урахуванням глибини розряду $LiFePO_4$ акумуляторів і режимів міжпікового заряду. Окрему увагу приділено питанням електричної безпеки, теплового режиму та узгодженню роботи системи з існуючими захистами.

Отримані результати підтверджують, що впровадження $LiFePO_4$ системи накопичення дозволяє обмежити максимальну споживану потужність, зменшити коефіцієнт завантаження трансформатора та скоротити втрати в мережі, що в результаті підвищує надійність електропостачання.

РОЗДІЛ 4
БЕЗПЕКА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Аналіз потенційних ризиків експлуатації акумуляторних систем

Експлуатація акумуляторних систем накопичення енергії на промислових об’єктах пов’язана з комплексом ризиків, які мають як технічну, так і організаційну природу. Навіть якщо $LiFePO_4$ акумулятори вважаються одними з найбільш стабільних серед літієвих хімічних систем, промисловий формат застосування змінює масштаб відповідальності: зростають рівні потужності, струми, енергоємність батарейних шаф, а також кількість суміжного обладнання, що працює в одному приміщенні. Тому безпечна робота накопичувача визначається також правильним проєктуванням, монтажем, експлуатаційною дисципліною та контролем стану.

Першою групою ризиків є електричні небезпеки. Акумуляторні системи працюють із постійною напругою та здатні віддавати дуже великі струми при короткому замиканні. Це створює реальну загрозу ураження електричним струмом, утворення електричної дуги, опіків і пожежі в разі помилок підключення або пошкодження ізоляції. Особливо критичними є роботи з обслуговуванням у шафах, де присутні відкриті струмоведучі частини, а також ситуації, коли персонал недооцінює небезпеку постійного струму, який має інші фізіологічні ефекти, ніж змінний. Додатковий ризик виникає під час комутаційних процесів, коли через перехідні режими можливі імпульсні перенапруги, локальні перегріви контактів і деградація з’єднань, що в подальшому може призвести до аварій.

Друга група ризиків пов’язана з тепловими процесами та можливістю розвитку аварійного нагріву. $LiFePO_4$ акумулятори відрізняються підвищеною термічною стабільністю, однак вони не є «невразливими». Джерелом нагріву можуть бути як внутрішні процеси в елементах при роботі з високими струмами, так і зовнішні фактори. До зовнішніх належать недостатня вентиляція, забруднення повітропроводів, висока температура приміщення, близьке розміщення тепловиділяючого обладнання, а також локальні «гарячі точки» в

місцях поганого контакту. Для промислової системи характерно, що навіть невелике відхилення в одному модулі на фоні великої батареї може накопичуватися і перетворюватися на суттєву проблему, якщо його вчасно не виявити. Тепловий ризик проявляється не тільки як пожежа; ще до цього можливі прискорене старіння елементів, перекіс параметрів між комірками, зниження корисної ємності, а також падіння ефективності системи.

Окремої уваги потребує ризик «теплового розгону», який для $LiFePO_4$ істотно нижчий, ніж для багатьох інших літієвих сполук, але в промисловій експлуатації його повністю виключати не можливо. Причинами можуть бути глибокий перезаряд, внутрішнє коротке замикання, механічне пошкодження елемента, неправильна робота системи керування батареєю або аварійне підвищення температури через зовнішнє джерело. У разі розвитку такого сценарію небезпека полягає в тому, що процес може супроводжуватися виділенням газів і тепла, а також переходом аварії на сусідні елементи через теплопередачу.

Третя група ризиків має хімічний характер. Хоча $LiFePO_4$ електроліти та катодні матеріали вважаються більш стабільними, у батарейних системах присутні компоненти, що при пошкодженні або перегріві можуть виділяти подразнювальні та токсичні продукти. Для персоналу це означає ризик подразнення органів дихання та слизових оболонок у разі витоку чи дегазації, особливо в замкнених приміщеннях без достатнього повітрообміну. Хімічні ризики також пов’язані з можливими витоками внаслідок виробничого дефекту, старіння ущільнень або механічного впливу, а також із неправильним поводженням з відпрацьованими модулями під час заміни та зберігання. Якщо заміна виконується без чіткої процедури, існує ризик змішування справних і дефектних модулів, що підвищує аварійність і ускладнює діагностику.

Четверта група ризиків стосується механічних і конструктивних факторів. Промислові батарейні шафи мають значну масу, тому будь-які роботи з монтажу, переміщення, фіксації на підлозі або заміни модулів можуть супроводжуватися небезпекою. Неправильне кріплення, порушення центру ваги, слабка несуча здатність підлоги або вібраційні впливи можуть призвести до деформації

корпусів, пошкодження кабельних вводів і механічного руйнування елементів. У технологічних приміщеннях також можливий вплив пилу, вологи та агресивних середовищ. Пил і конденсат підвищують ризик витоків струму та корозії контактів, що є типовою прихованою причиною аварій, бо дефект накопичується поступово і проявляється вже на стадії суттєвого нагріву або пробою.

П’ята група ризиків пов’язана з системою керування та взаємодією з електромережею. Будь-яка акумуляторна система в промисловості фактично працює як складний комплекс, де важливими є інвертор, комутаційні апарати, датчики, алгоритми керування, а також система BMS. Для $LiFePO_4$ основною умовою безпеки є коректний контроль напруги кожної комірки, температури й балансування . Якщо датчик температури працює некоректно або алгоритм керування має помилку, система може допускати небезпечні режими, навіть якщо сама батарея справна. Так само ризикованим є неправильне налаштування порогів заряду й розряду, коли акумулятор працює за межами рекомендованого діапазону, що спочатку проявляється деградацією, а потім може спричинити аварійні стани. У промисловому середовищі ризик посилюється перехідними процесами в мережі, можливими провалами напруги, а також імпульсними перенапругами, які впливають на силову електроніку та ізоляцію.

Важливими також є ризики людського фактора та організації робіт. Для акумуляторних систем небезпечними є ситуації, коли персонал має «побутове» уявлення про батареї й переносить його на промисловий рівень. Типові проблеми виникають через відсутність допуску до робіт під напругою, порушення процедур блокування та маркування, нехтування перевіркою відсутності напруги, використання інструменту без ізоляції, а також через роботи «в поспіху» під час аварій чи простою виробництва. Суттєвим фактором є і неправильна реакція на ранні ознаки несправності, наприклад, запах, підвищену температуру шафи, незвичний шум вентиляції або повідомлення системи моніторингу. Якщо такі сигнали ігноруються, відмова може перейти з керованої стадії в аварійну.

Важливо враховувати й ризики, пов’язані з пожежною безпекою в контексті охорони праці. У разі пожежі або значного перегріву небезпека полягає

не лише в полум'ї, а й у димі, токсичних продуктах розкладання та зниженні видимості, що ускладнює евакуацію й роботу персоналу. Для промислового об'єкта критичним є правильне зонування батарейного обладнання, відсутність горючих матеріалів поруч, обмеження доступу сторонніх осіб і можливість швидкого відключення системи у разі аварії. Навіть якщо $LiFePO_4$ загалом має високу пожежну стійкість, масштаб промислової батареї робить наслідки потенційної аварії суттєвими, тому аналіз ризиків повинен бути консервативним [21, 22].

4.2. Заходи з охорони праці та техніки безпеки

Особливість $LiFePO_4$ полягає у підвищеній термічній стабільності порівняно з іншими літієвими сполуками, але це не скасовує вимог до організації робочого місця, допуску персоналу та контролю параметрів. У промислових умовах ключовою ідеєю є перехід від «реагування на аварію» до системного запобігання, коли безпека закладена в регламентах, інструкціях, технічних рішеннях і дисципліні виконання робіт.

Першочергово визначається режим доступу до батарейного приміщення або зони розміщення шаф. Доступ до обладнання повинні мати лише працівники, які пройшли навчання з електробезпеки та ознайомлені з інструкціями виробника і локальними регламентами підприємства. Умовою допуску є розуміння специфіки постійного струму, небезпеки короткого замикання та електричної дуги. Практика показує, що навіть короткочасний контакт інструмента з шинами або помилка при встановленні запобіжника може призвести до миттєвого виділення великої енергії. Тому техніка безпеки в даному випадку будується на принципі «захист від помилки»: усі роботи виконуються за письмовим завданням або нарядом, а порядок дій має бути фіксований і повторюваний.

Під час технічного обслуговування та ремонту обов'язково застосовується блокування та запобігання повторному вмиканню. Акумуляторна система та інвертор повинні мати можливість безпечного відключення, ізоляції та перевірки відсутності напруги. Персонал має виконувати контроль не тільки на стороні

змінного струму, а й на стороні постійного струму, оскільки навіть після відключення інвертора батарейні модулі залишаються джерелом енергії. У промислових шафах додаткову небезпеку створюють конденсатори в силовій електроніці, які можуть зберігати заряд і після знеструмлення. Тому регламент має передбачати час розряду, контроль напруги та підтвердження безпечного стану перед початком робіт.

Вимоги до засобів індивідуального захисту визначаються характером робіт і рівнем напруги. У зоні батарейних шаф необхідними є діелектричні рукавички відповідного класу, захисний щиток або окуляри, спецодяг, що зменшує ризик опіків, та інструмент з ізольованими рукоятками. Варто зауважити, що засоби захисту втрачають ефективність при неправильному зберіганні, забрудненні та прострочених випробуваннях, тому вони мають системно перевірятися та вестися в обліку. Для робіт, де існує ризик утворення електричної дуги, обирається підвищений рівень захисту обличчя та рук, а також максимально обмежується можливість контакту з відкритими струмоведучими частинами.

Окремим блоком заходів є забезпечення безпечних кліматичних і санітарних умов у приміщенні. $LiFePO_4$ акумулятори та силова електроніка чутливі до перегріву, тому приміщення має бути обладнане вентиляцією або кондиціюванням із підтримкою температури в робочому діапазоні та відведенням тепла від шаф. Важливо уникати утворення конденсату, оскільки волога підвищує ризик витоків струму, корозії контактів і деградації ізоляції. Також необхідно зменшити запиленість, оскільки пил може накопичуватись на поверхнях і в каналах охолодження, погіршуючи тепловідвід та створюючи додаткові осередки нагріву. Для промислових майданчиків це часто є недооціненим фактором, хоча саме він стає причиною поступової деградації, яку важко помітити без регулярних оглядів.

Технічні заходи безпеки повинні включати контроль стану акумуляторів за допомогою системи BMS та системи моніторингу. Для $LiFePO_4$ критичними є контроль напруги на комірках, температури модулів, струму заряду/розряду та балансування. Практичний сенс цих заходів полягає в ранньому виявленні відхилень, коли проблема ще не перейшла в аварійний режим. Наприклад,

підвищення температури на одному модулі в порівнянні з іншими часто свідчить про поганий контакт, локальне перевантаження або деградацію елемента. Такі відхилення повинні мати пороги попередження та аварійного відключення. Важливо, щоб реакція системи була прогнозованою: при досягненні критичних значень відбувається автоматичне зниження потужності або відключення з фіксацією події, а персонал отримує чітке повідомлення про причину та подальші дії.

Організаційні заходи охорони праці також повинні охоплювати порядок виконання робіт при заміні модулів і поводженні з відпрацьованими елементами. Навіть якщо $LiFePO_4$ акумулятори більш стабільні, механічне пошкодження модуля, неправильне транспортування або зберігання може створити приховані дефекти. Тому модулі мають переміщуватися з використанням відповідних засобів малої механізації, з дотриманням обмежень щодо ударів і вібрації. Після демонтажу модуль повинен ізолюватися від випадкових контактів, а його клеми закриватися захисними ковпачками. Неприпустимим є зберігання модулів у зоні з підвищеною вологістю або поблизу джерел тепла. Також важливо уникати змішування різних за станом і параметрами модулів в одному ланцюзі, оскільки це може викликати нерівномірний розподіл струмів і прискорену деградацію [23].

Особливу увагу в межах техніки безпеки потрібно приділити пожежній профілактиці та діям у нештатних ситуаціях. Для $LiFePO_4$ ризик теплового розгону низький, але при промислових енергоємностях навіть малоймовірні події мають суттєві наслідки. У приміщенні повинні бути визначені безпечні проходи та зони евакуації, а персонал має бути ознайомлений із порядком дій при появі диму, запаху, різкому підвищенні температури шафи або спрацюванні сигналізації. Важливо, щоб аварійне відключення системи було доступним і зрозумілим, а інструкція передбачала не лише відключення, а й алгоритм сповіщення відповідальних осіб та фіксацію події для подальшого розслідування. Небезпечною помилкою є спроба «швидко відкрити шафу і подивитися», якщо система сигналізує про перегрів: у цьому випадку є ризик

контакту з гарячими елементами, продуктами дегазації або виникнення електричної дуги.

Щоб знизити ризики, пов’язані з електричною дугою та коротким замиканням, у системі повинні бути передбачені селективні захисти та обмеження струму. Тобто при аварійному режимі відключення має бути швидким і локальним, щоб не спричиняти масштабних пошкоджень. Стан контактних з’єднань і силових клем повинен контролюватися під час планових оглядів, оскільки саме ослаблені контакти часто стають причиною локального нагріву. Для промислової системи також важливі заземлення та вирівнювання потенціалів, що зменшує ризики ураження струмом при пошкодженні ізоляції або виникненні пробоїв [24].

Оскільки система накопичення енергії працює в складі промислової електромережі, заходи охорони праці мають враховувати взаємодію з технологічним обладнанням і режимами підприємства. Якщо система використовується для компенсації піків, то можливі часті цикли заряду і розряду, а отже потрібно контролювати тепловий режим і не допускати роботи на межі допустимих параметрів. Для $LiFePO_4$ акумуляторів важливо дотримуватися коректних меж напруги та температури, а також уникати глибокого перерозряду, який може знижувати ресурс і створювати нестабільні режими при наступному заряді. Саме тому до комплексу безпеки входить налаштування обмежень на рівні інвертора та BMS, а також перевірка коректності цих налаштувань після кожного втручання в систему.

4.3. Розробка рекомендацій щодо безпечної експлуатації електроустановок

Безпечна експлуатація електроустановок на промисловому об’єкті, де впроваджується $LiFePO_4$ система накопичення енергії, потребує чітко визначених рекомендацій, які охоплюють як режим нормальної роботи, так і дії в нештатних ситуаціях. На відміну від традиційних схем електропостачання, наявність накопичувача додає джерело енергії в контур підприємства, що впливає на умови відключення, обслуговування та взаємодію з системами

захисту. Тому рекомендації мають бути спрямовані на зменшення ризиків ураження електричним струмом, виникнення коротких замикань, перегріву елементів, а також на забезпечення прогнозованих дій персоналу в ситуаціях, коли потрібне швидке прийняття рішень.

Для електроустановок з акумуляторними системами важливо, щоб межі відповідальності між електротехнічним персоналом, службою автоматизації та експлуатаційними працівниками були визначені однозначно. Це пов’язано з тим, що частина обладнання належить до силової частини електроустановки (шафи постійного струму, інвертор, комутаційні апарати), а частина – до систем керування (BMS, контролер, канали зв’язку та моніторинг). У реальній експлуатації більшість критичних подій починається з «дрібних» відхилень, які помічаються в телеметрії або за поведінкою вентиляції та температури, тому важливо, щоб був визначений порядок, хто саме реагує на попереджувальні сигнали та хто має право ухвалювати рішення про обмеження потужності або відключення системи.

Для $LiFePO_4$ систем важливо, що навіть при відключенні від мережі на стороні змінного струму батарейні шафи залишаються під напругою на стороні постійного струму. Це означає, що потрібно затвердити чіткий порядок послідовності дій: спочатку зняття навантаження та зупинка перетворювача, далі – відключення і блокування комутаційних апаратів, після цього – контроль відсутності напруги та підтвердження розряду ємнісних елементів силової електроніки. Для персоналу принципово важливо розуміти, що «вимкнено» у випадку накопичувача не завжди означає «знеструмлено», тому будь-які роботи всередині шаф допускаються лише після формального підтвердження безпечного стану.

$LiFePO_4$ акумулятори мають кращу термостійкість і більш прогнозовану поведінку при циклічній роботі, але вони залишаються чутливими до відхилень за напругою, температурою та струмом. Тому в доцільно виділити правило, що система повинна працювати в межах, заданих виробником і підтверджених налаштуваннями BMS та інвертора. Практично це означає, що при підвищенні температури вище робочого діапазону система має автоматично зменшувати

потужність, а при досягненні критичних значень – відключатися. Аналогічно, недопустимими є режими перезаряду або глибокого розряду, які можуть не одразу привести до аварії, але створюють умови для деградації елементів та появи дефектів, що в подальшому переростають у небезпечні стани.

Безпечна експлуатація електроустановок завжди спирається на планові огляди та технічне обслуговування, але для $LiFePO_4$ систем важливим є моніторинг параметрів окремих модулів і комірок. Варто зазначити, що будь-яка нетипова асиметрія між модулями за напругою або температурою розглядається як потенційна несправність, яка потребує діагностики. Навіть якщо система продовжує працювати, локальний перегрів або відхилення напруги можуть свідчити про поганий контакт, деградацію елемента або порушення балансування. З практичної точки зору безпечніше зупинити систему й перевірити причину, ніж продовжувати роботу до аварійного відключення, коли наслідки вже значно серйозніші. Важливим елементом профілактики є також контроль стану контактних з’єднань, оскільки ослаблення клеми або збільшення перехідного опору є типовою причиною локального нагріву в силових ланцюгах.

Налаштування захистів повинні бути узгоджені з можливими режимами роботи інвертора та батарейної частини, включно з компенсацією піків навантаження. Якщо захисти налаштовані без урахування того, що частина потужності може надходити від накопичувача, можливі некоректні спрацювання або, навпаки, недостатньо швидке відключення при аварії. Також важливо враховувати, що силова електроніка може формувати інші характеристики струмів у порівнянні з класичними джерелами живлення, тому перевірка селективності та коректності спрацювань має бути частиною введення в експлуатацію і періодичних перевірок.

Для $LiFePO_4$ систем характерно модульне виконання, але модулі мають значну масу, а їхні клеми можуть залишатися під напругою або накопичувати заряд. Тому необхідним є використання інструмента з ізоляцією, застосування засобів індивідуального захисту та виконання операцій з переміщення модулів із дотриманням правил безпечної праці. Важливою є процедура ізоляції демонтованого модуля, щоб виключити випадкове коротке замикання або

контакт з провідними частинами. Для промислового об’єкта також актуально, щоб заміна проводилася лише сумісними модулями з близькими параметрами, оскільки встановлення «слабкого» модуля в ланцюг може спричинити нерівномірний розподіл навантаження, локальний перегрів і аварійні режими.

При появі ознак перегріву, диму, запаху, різкого шуму вентиляції, нетипових сигналів моніторингу або частих аварійних відключень персонал не виконує «самостійні експерименти», а діє за визначеним алгоритмом. Першочерговим є переведення системи в безпечний стан, відключення з боку перетворювача й батарейної частини, обмеження доступу до зони та виклик відповідальних осіб. Для $LiFePO_4$ систем важливо розуміти, що навіть при нижчій пожежній небезпеці у порівнянні з іншими літієвими сполуками у випадку аварії можуть виділятися гази і продукти розкладання електроліту, тому відкривання шафи без оцінки ризиків є небезпечним. Завжди пріоритетом є безпека людей, а не збереження обладнання.

Ефективним підходом для безпечної експлуатації електроустановок є регулярне відпрацювання типових сценаріїв: аварійне відключення, спрацювання сигналізації, втрата зв’язку з системою керування, відхилення температури одного модуля, а також відновлення роботи після зупинки. Практична цінність таких тренувань у тому, що вони зменшують вплив людського фактора і роблять дії персоналу прогнозованими [25].

Висновки до розділу 4

Комплексно розглянуто питання безпеки та охорони праці під час експлуатації промислових систем накопичення енергії з використанням $LiFePO_4$ акумуляторів. Проведений аналіз потенційних ризиків показав, що навіть за умови підвищеної термічної та хімічної стабільності $LiFePO_4$ системи, промисловий масштаб застосування створює низку електричних, теплових, механічних та організаційних небезпек. Особливу увагу приділено ризикам, пов’язаним із високими струмами постійного струму, локальним перегрівом, роботою силової електроніки та людським фактором.

У розділі обґрунтовано необхідність впровадження системних заходів з охорони праці та техніки безпеки, які охоплюють організацію доступу до обладнання, порядок виконання робіт, застосування засобів індивідуального захисту, контроль мікроклімату приміщень і використання систем моніторингу та керування. Розроблені рекомендації щодо безпечної експлуатації електроустановок акцентують увагу на стандартизації процедур пуску, зупинки та обслуговування, узгодженні захистів із режимами роботи накопичувача, а також на підготовці персоналу до дій у нештатних ситуаціях.

РОЗДІЛ 5
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ

5.1. Аналіз змін енергоспоживання при впровадженні системи накопичення

Впровадження системи накопичення енергії на основі $LiFePO_4$ впливає не лише на величину максимальної потужності, але й на загальний обсяг електроенергії, що споживається підприємством із мережі. У періоди пікових навантажень через кабельні лінії та трансформатор проходять підвищені струми. Оскільки активні втрати в провідниках залежать від квадрата струму, то навіть короткочасне перевищення навантаження призводить до збільшення технічних втрат електроенергії.

Втрати активної потужності у трифазній лінії визначаються за формулою (5.1):

$$\Delta P = 3I^2R, \tag{5.1}$$

де ΔP – втрати активної потужності, Вт;

I – фазний струм, А;

R – активний опір провідника однієї фази, Ом.

До впровадження накопичувача струм у піковий період становив 300 А, а активний опір фази дорівнював 0,02 Ом. Тоді втрати становили:

$$\Delta P_1 = 3 \cdot 300^2 \cdot 0{,}02 = 5400 \text{ Вт}$$

Після встановлення системи накопичення пікова потужність зменшилася, а струм знизився до 240 А. В результаті втрати становлять:

$$\Delta P_2 = 3 \cdot 240^2 \cdot 0{,}02 = 3456 \text{ Вт}$$

Різниця втрат потужності становить:

$$\Delta P = 5400 - 3456 = 1944 \text{ Вт}$$

Якщо тривалість пікового режиму складає 1 годину на добу, то економія електроенергії становить приблизно 1,94 кВт·год щодня. За рік це приблизно 710 кВт·год.

Отже, система накопичення є інструментом прямої економії кВт·год завдяки зменшенню технічних втрат у внутрішній мережі підприємства. Хоча економія на рівні окремої години здається незначною, у річному вимірі вона стає відчутною та доповнює економічний ефект від зниження пікової потужності.

5.2. Аналіз впливу $LiFePO_4$ системи накопичення на режим роботи мережі

Впровадження $LiFePO_4$ системи накопичення енергії дозволяє змінити характер роботи електричної мережі підприємства, насамперед, у пікових режимах. Якщо до встановлення накопичувача максимальне навантаження повністю покривалося за рахунок зовнішньої мережі, то після інтеграції частина потужності в критичні моменти забезпечується батарейною системою. Оскільки більшість негативних явищ у промислових мережах пов’язані саме з перевищенням струмів (перегрів, падіння напруги, прискорене старіння ізоляції), навіть часткове згладжування піків помітно стабілізує роботу системи.

Зменшення струму можна оцінити через співвідношення між активною потужністю та струмом у трифазній мережі (5.2):

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}, \qquad (5.2)$$

де I – лінійний струм, А;

P – активна потужність, Вт;

U – лінійна напруга, В;

cosφ – коефіцієнт потужності.

До впровадження системи накопичення пікова потужність підприємства становила 400 кВт при напрузі 0,4 кВ і коефіцієнті потужності 0,9. Тоді струм дорівнював:

$$I_1 = \frac{400000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}9} = 642 \text{ А}$$

Після компенсації 150 кВт за рахунок накопичувача навантаження зменшується до 250 кВт:

$$I_2 = \frac{250000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}9} = 401 \text{ А}$$

Отже, зменшення струму становить приблизно 241 А, що є суттєвим для мережі 0,4 кВ. Зниження струму більш ніж на 30% означає істотне зменшення теплового навантаження на трансформатор та провідники. Оскільки нагрів елементів електромережі залежить від квадрата струму, навіть відносно невелике зменшення потужності дає непропорційно великий позитивний ефект для обладнання.

Крім цього, стабілізується рівень напруги на шинах розподільчого щита, що важливо для електроприводів і чутливої автоматики. Менша глибина провалів напруги під час запуску двигунів покращує умови роботи обладнання та знижує ризик аварійних відключень.

Таким чином, застосування $LiFePO_4$ акамуляторів впливають на мережу не лише як допоміжне джерело енергії, а як елемент, що оптимізує режим її роботи. Вони сприяють зниженню струмових перевантажень, покращенню теплового режиму трансформатора та підвищенню стабільності напруги, що в комплексі підвищує надійність електропостачання підприємства.

5.3. Техніко-економічна оцінка впровадження системи накопичення енергії на базі $LiFePO_4$ акумуляторів

Техніко-економічна доцільність впровадження системи накопичення визначається співвідношенням між капітальними витратами на обладнання та отриманим річним економічним ефектом. У даній роботі економічний ефект формується за рахунок двох складових: зменшення технічних втрат електроенергії та зниження максимальної споживаної потужності.

Як було визначено в підпункті 5.1, економія електроенергії за рахунок зменшення втрат становить приблизно 700 кВт·год на рік. Якщо прийняти середню вартість електроенергії для промислового споживача на рівні 15 грн/кВт·год, то річну економію коштів можна розрахувати за формулою (5.3):

$$E_1 = \Delta W \cdot c, \tag{5.3}$$

де ΔW – річна економія електроенергії, кВт·год;

с – вартість електроенергії, грн/кВт·год.

$$E_1 = 710 \cdot 15 = 10650 \text{ грн/рік}$$

Додатковий економічний ефект пов’язаний зі зменшенням максимальної потужності на 150 кВт. Якщо умовна плата за резервування потужності або складова тарифу становить 150 грн за 1 кВт на рік, то економія визначається за формулою (5.4):

$$E_2 = \Delta P \cdot c_p, \tag{5.4}$$

де ΔP – зменшення максимальної потужності, кВт;

c_p – плата за 1 кВт потужності, грн/(кВт·рік).

$$E_2 = 150 \cdot 150 = 22500 \text{ грн/рік}$$

Сумарний річний економічний ефект становить:

$$\sum E = E_1 + E_2 = 10650 + 22500 = 33150 \text{ грн/рік}$$

Проста окупність системи визначається як відношення загальних капітальних витрат до річного економічного ефекту (5.5):

$$T = \frac{C}{\sum E}, \tag{5.5}$$

де С –загальні капітальні витрати, грн;

∑Е – сумарний річний економічний ефект, грн.

Якщо орієнтовна вартість системи накопичення з інвертором, монтажем та налаштуванням становить 400000 грн, то термін окупності дорівнює:

$$T = \frac{400000}{33150} \approx 12 \text{ років}$$

Як бачимо, техніко-економічний аналіз показує, що впровадження $LiFePO_4$ системи накопичення є обґрунтованим з точки зору стабілізації режиму роботи мережі та довгострокової оптимізації витрат, особливо в умовах зростання вартості електроенергії.

Висновки до розділу 5

У п’ятому розділі було комплексно проаналізовано енергетичні та економічні результати впровадження системи накопичення електроенергії на основі $LiFePO_4$ акумуляторів у мережі промислового підприємства. Проведені розрахунки підтвердили, що згладжування пікових навантажень сприяє зниженню струмових перевантажень у внутрішній мережі та, відповідно, зменшенню активних втрат у кабельних лініях. Навіть при відносно невеликій тривалості пікового режиму річна економія електроенергії набуває практичного значення, що свідчить про реальний ефект від оптимізації режиму роботи мережі.

Оцінка впливу накопичувача на параметри трифазної системи показала, що часткова компенсація потужності істотно зменшує лінійні струми. Це позитивно відображається на тепловому режимі силового трансформатора, строку служби ізоляції та стабільності напруги на розподільчих шинах. Таким чином, система накопичення виконує не лише функцію резервного джерела, а й виступає елементом регулювання режиму електропостачання.

Проведений техніко-економічний розрахунок дозволив визначити річний економічний ефект від зменшення втрат та скорочення максимальної споживаної потужності. Встановлено, що навіть за помірних тарифних показників система має прийнятний термін окупності. При цьому слід враховувати, що зростання вартості електроенергії в майбутньому додатково підвищить економічну привабливість впровадження.

Узагальнюючи отримані результати, можна зробити висновок, що використання $LiFePO_4$ системи накопичення є технічно доцільним і економічно обґрунтованим рішенням для промислового підприємства, оскільки воно підвищує енергоефективність, покращує режим роботи мережі та створює умови для довгострокового зниження експлуатаційних витрат.

ВИСНОВКИ

1. За результатами аналізу сучасного стану проблеми пікових навантажень встановлено, що короткочасні перевищення потужності в промислових мережах призводять до підвищеного струмового та теплового навантаження на трансформатори, кабельні лінії та комутаційну апаратуру. Це спричиняє додаткові втрати електроенергії, прискорене старіння обладнання та зростання витрат підприємства. Таким чином, проблема пікових режимів має як технічний, так і економічний характер, що обґрунтовує доцільність застосування систем накопичення енергії.

2. Обґрунтовано, що найбільш раціональною стратегією компенсації пікових навантажень є режим обмеження максимальної потужності з використанням $LiFePO_4$ акумуляторів. Проведені розрахунки підтвердили можливість підбору такої конфігурації батарейної системи, яка забезпечує покриття пікової складової навантаження без перевантаження інверторного обладнання. Отримані параметри узгоджуються з режимами роботи підприємства та відповідають умовам надійної експлуатації.

3. Дослідження впливу накопичувача на електричну мережу показало, що зменшення пікових струмів позитивно впливає на тепловий режим трансформатора та стабільність напруги. Зниження максимальних значень повної потужності дозволяє зменшити коефіцієнт завантаження обладнання. У результаті підвищується надійність електропостачання та зменшується ризик аварійних режимів, особливо під час запуску потужних електроприймачів.

4. Під час аналізу етапів інжинірингового проєктування встановлено, що інтеграція системи накопичення потребує комплексного підходу, який охоплює аналіз структурної схеми мережі, вибір точки підключення та узгодження параметрів інвертора з існуючою інфраструктурою. Найбільш ефективним можна вважати підключення на шинах низької напруги головного розподільчого пристрою, що дозволяє впливати на загальний графік електроспоживання підприємства.

5. Проведений техніко-економічний аналіз показав, що впровадження $LiFePO_4$ системи накопичення забезпечує позитивний річний економічний ефект за рахунок зменшення технічних втрат електроенергії та оптимізації структури споживання. Отриманий термін окупності свідчить про фінансову доцільність проєкту в умовах діючих тарифів. Крім безпосередньої економії, система позитивно впливає на режим роботи мережі: знижуються струмові перевантаження, покращується тепловий стан трансформатора та стабілізується напруга. Сукупність цих факторів підтверджує, що застосування $LiFePO_4$ системи є обґрунтованим рішенням для промислового підприємства як з енергетичної, так і з економічної точок зору.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергетичний менеджмент / Ю. В. Дзядикевич, Р. Б. Гевко, М. В. Буряк, Р. І. Розум. Тернопіль: Економічна думка, 2014. 335 с.
2. Щербак І. Є. Оцінка вирівнювання графіків електричних навантажень. Світлотехніка та електроенергетика. 2018. № 1. С. 36–39.
3. Кулик М. М., Дрьомін І. В. Узагальнена математична модель та характеристики адаптивних систем автоматичного регулювання частоти і потужності. Проблеми загальної енергетики. 2015. Вип. 4 (43). С. 14-23
4. Говоров П. П., Харченко В. Ф., Говоров В. П. Автоматизація керування режимами міських електричних мереж: монографія. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 229 с.
5. The 1st International scientific and practical conference “Modern problems of science, education and society” (March 26-28, 2023) SPC “Sciconf.com.ua”, Kyiv, Ukraine. 2023. 1016 p.
6. Volodymyr Derii. Electric energy storages. System Research in Energy, 2023. 1 (72). 12-24.
7. Омеляненко Г. В., Черкашина В. В., Макаров А. О. Дослідження доцільності застосування накопичувачів електричної енергії в електричних мережах України. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. вип. 1(10). Липень 2025. с. 101-106.
8. Малогулко Ю. В., Ластівка В. Б. Дослідження сучасних технологій систем накопичення енергії. №65. 2022. С. 65-68.
9. Оксенич Р. В., Мірошник О. О., Мороз О. М., Пазій В. Г. Порівняльний аналіз накопичувачів енергії різних типів – літій-залізо-фосфатних ($LiFePO_4$) та натрій-іонних (Na-Ion). Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. вип. 2 (9). Грудень 2024. с. 57-62.

10. Sui Xin, He Shan, Meng Jinhao, Stroe Daniel-Ioan, Huang Xinrong, Teodorescu Remus. Optimization of the discharge cut-off voltage in LiFePO4 battery packs. 2019. P.1-P.8.

11. Оксенич Р. В., Галько С. В., Середа А. І., Попадченко С. А., Зеленков Д. М. Порівняльний аналіз літій-залізо-фосфатних та натрій-іонних накопичувачів енергії. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2025. 25(2). С. 71-81.

12. Брич В. Я. Проблеми та напрямки трансформації підприємств енергетики: монографія / В. Я. Брич, Т. О. Артемчук. Тернопіль: ТНЕУ, 2018. 168 с.

13. Балюта С. М. Системний аналіз і підходи до побудови автоматизованої системи керування електроспоживанням та електропостачанням промислового підприємства. Наукові праці НУХТ. 2017. Т. 23, № 5. Ч. 2. С. 83-89.

14. Ягуп В. Г., Ягуп К. В. Моделювання та оптимізація режимів систем енергопостачання та електроспоживання: навч. посіб. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 183 с.

15. J. Shen, A. Khaligh A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system. IEEE Trans. Transp. Electrif. 2015, 1, 223–231.

16. Подчашинський Ю. О., Шавурський Ю. О., Лугових О. О. Проектування та конструювання пристроїв та систем управління: Навчальний посібник. Житомир: ЖДТУ, 2018. 280 с.

17. Маліновський А. А. Програмна та алгоритмічна підтримка енергетичного аудиту будівель та їх енергетичної сертифікації. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2018. № 2. С. 96-102.

18. Шевченко С. Ю. Особливості вибору обмежувачів перенапруг в мережах 6-35 кВ. Вісник Чернігівського державного технологічного Університету. Серія: технічні науки. Чернігів: ЧДТУ. 2013. № 2(65). С. 224-230.

19. Матеріали III Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції «ІННОВАЦІЇ: теорія і практика». Кропивницький: Академія Прикладних наук. 2022. 115 с.

20. Стисло Б., Зайцев Р., Мінакова К., Кіріченко М., Єресько О. Аналіз ефективності схем активного балансування акумуляторних батарей // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2021. № 2 (8). С. 38-45.

21. ДСТУ-Н Б А.3.2-1:2007 Система стандартів безпеки праці. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використанні в процесі зведення та експлуатації об`єктів будівництва.

22. Лемішко М. В., Гаврилюк А. Ф. Пожежна небезпека літій-іоних батарей електромобілів. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: Матеріали XIV Міжнароднооїнауково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. Львів: ЛДУБЖД, 2024. 33-34 с.

23. Новіков Ф. В. Безпека життєдіяльності та інноваційні технології виробництва: навч. посіб. Дніпро: ЛІРА, 2023. 220 с.

24. Сєріков Я. О. Промислова безпека та соціальний захист працівників виробничих підприємств, компаній і корпорацій (організація монтажу, ремонту і експлуатації виробничих об’єктів): посібник.Харків: Компанія ШЕЛЛ в Україні. ХНУМГ, 2015. 252 с.

25. Harasymchuk I., Potapskyi P., Vusatyi M., Pecheniuk A. Issues of building an effective occupational safety management system in electrical installations of a modern enterprise. Public Management and Policy. 2025. No. 7-8 (11-12).

ДОДАТКИ

Додаток А

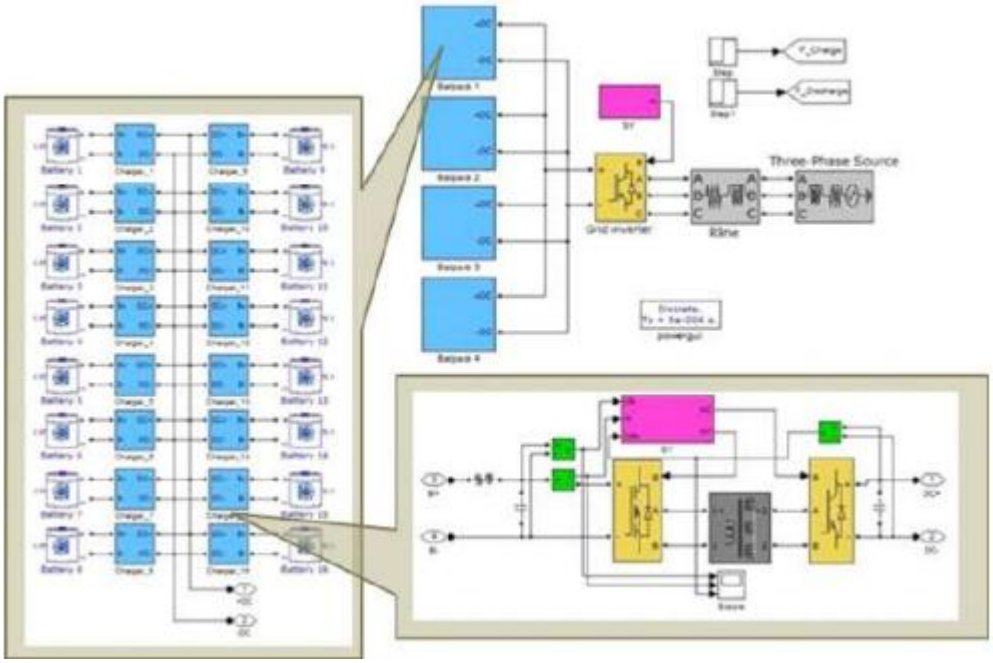


Рис. А.1. Схема накопичувача на базі Li-Ion акумуляторів

Додаток Б

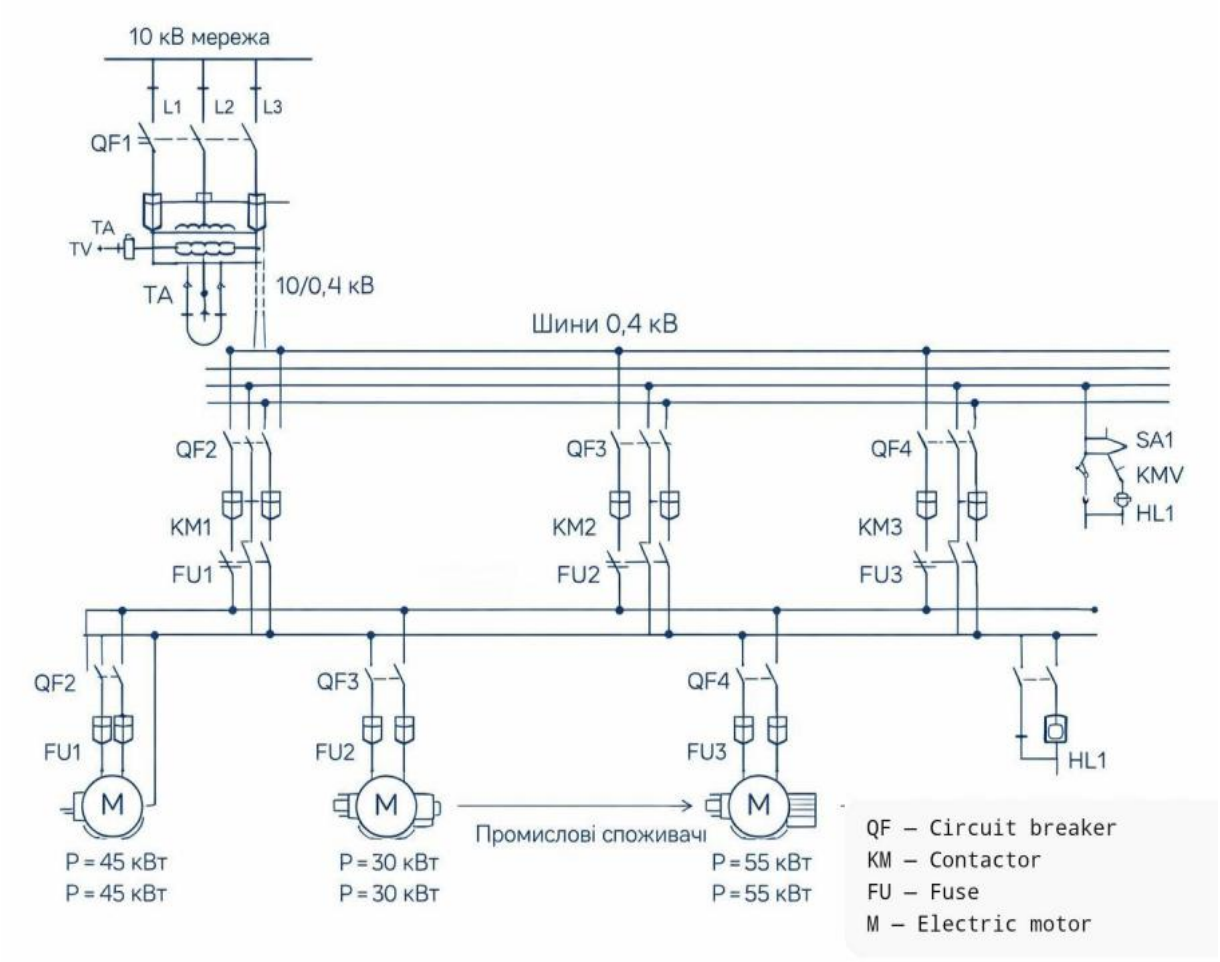


Рис. Б.1. Схема електропостачання підприємства до встановлення $LiFePO_4$ акамулятора

Додаток В

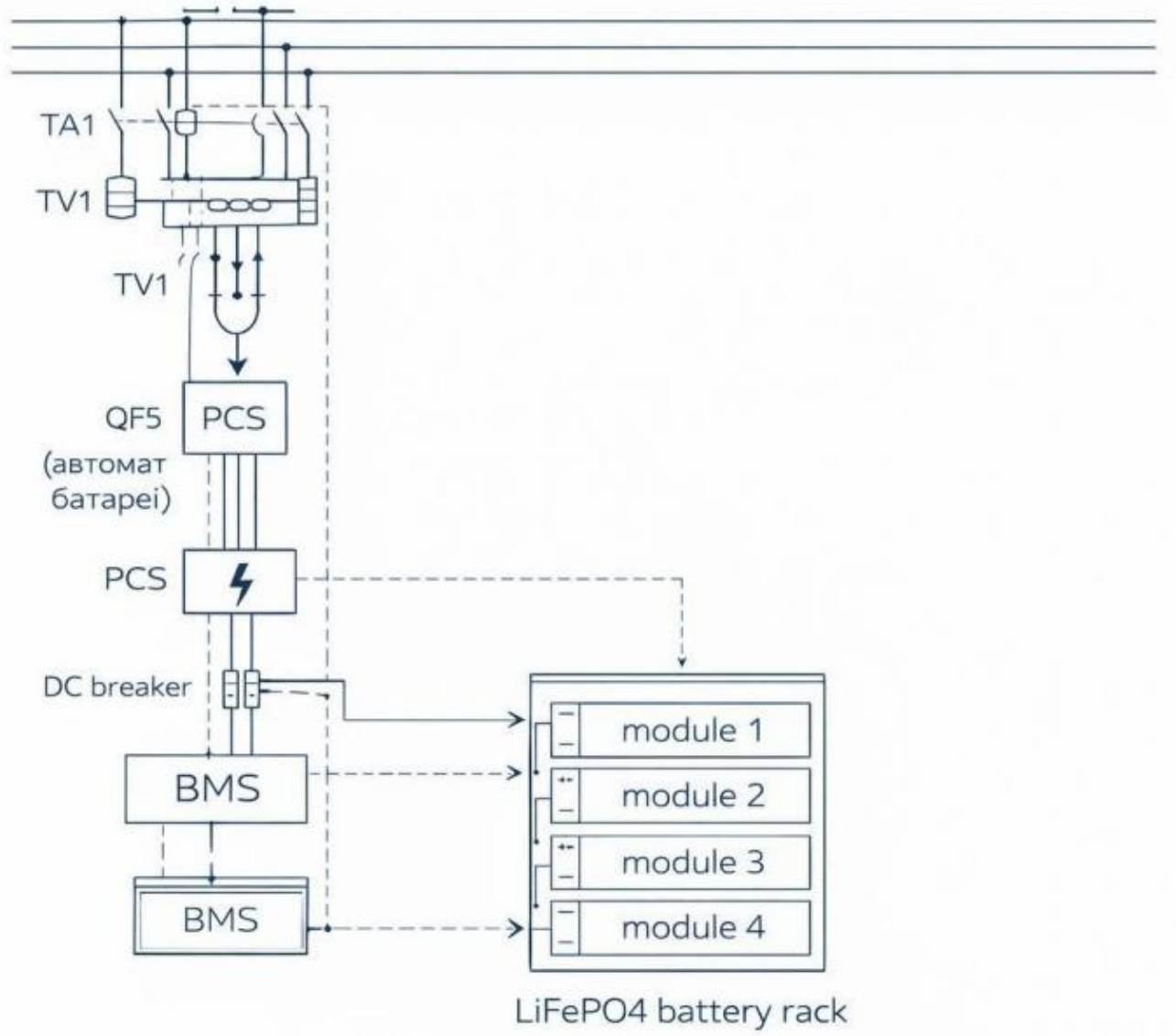


Рис. В.1. Електрична схема підключення батареї до мережі

Додаток Г

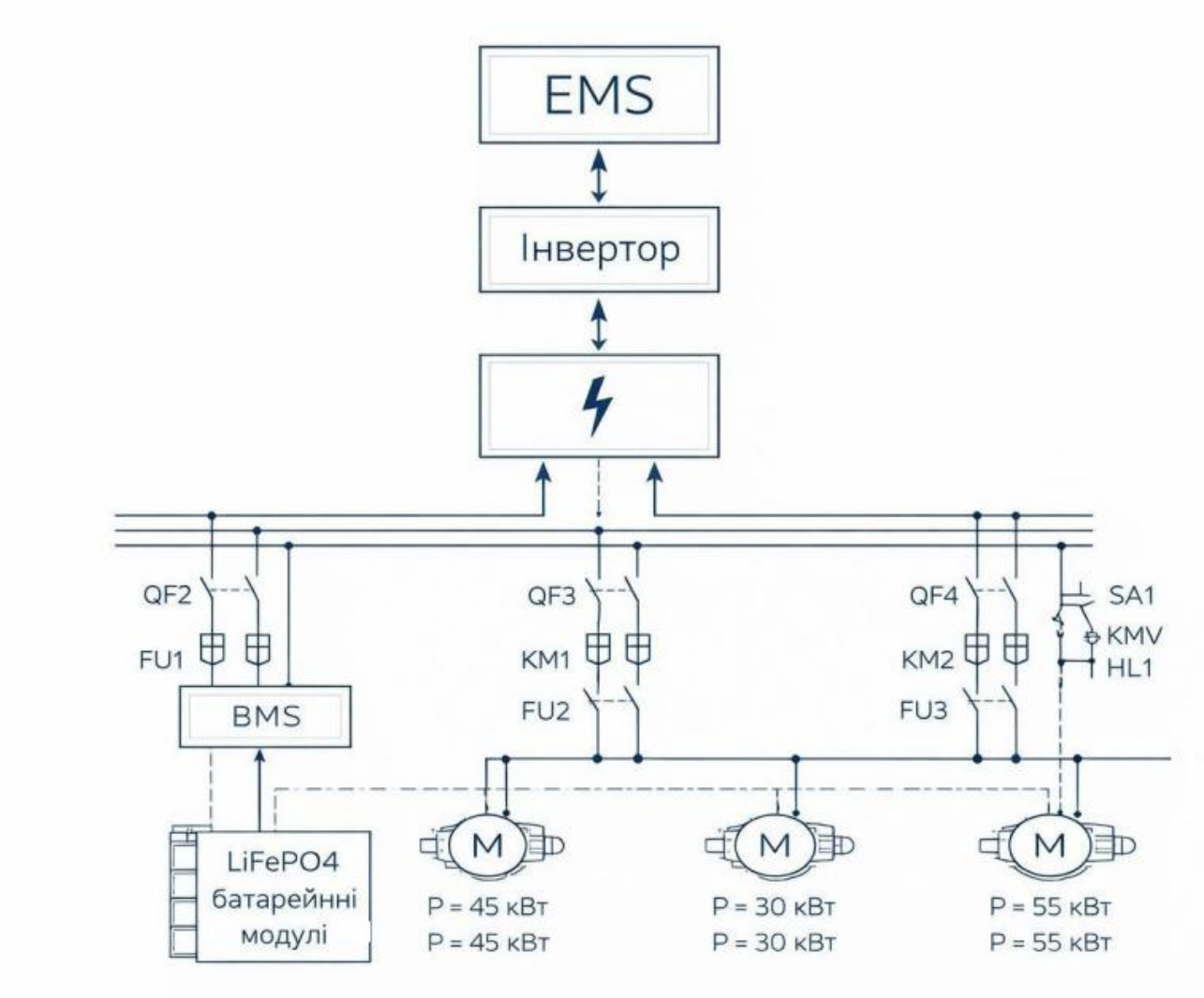


Рис. Г.1. Структурна схема системи накопичення енергії

Додаток Е

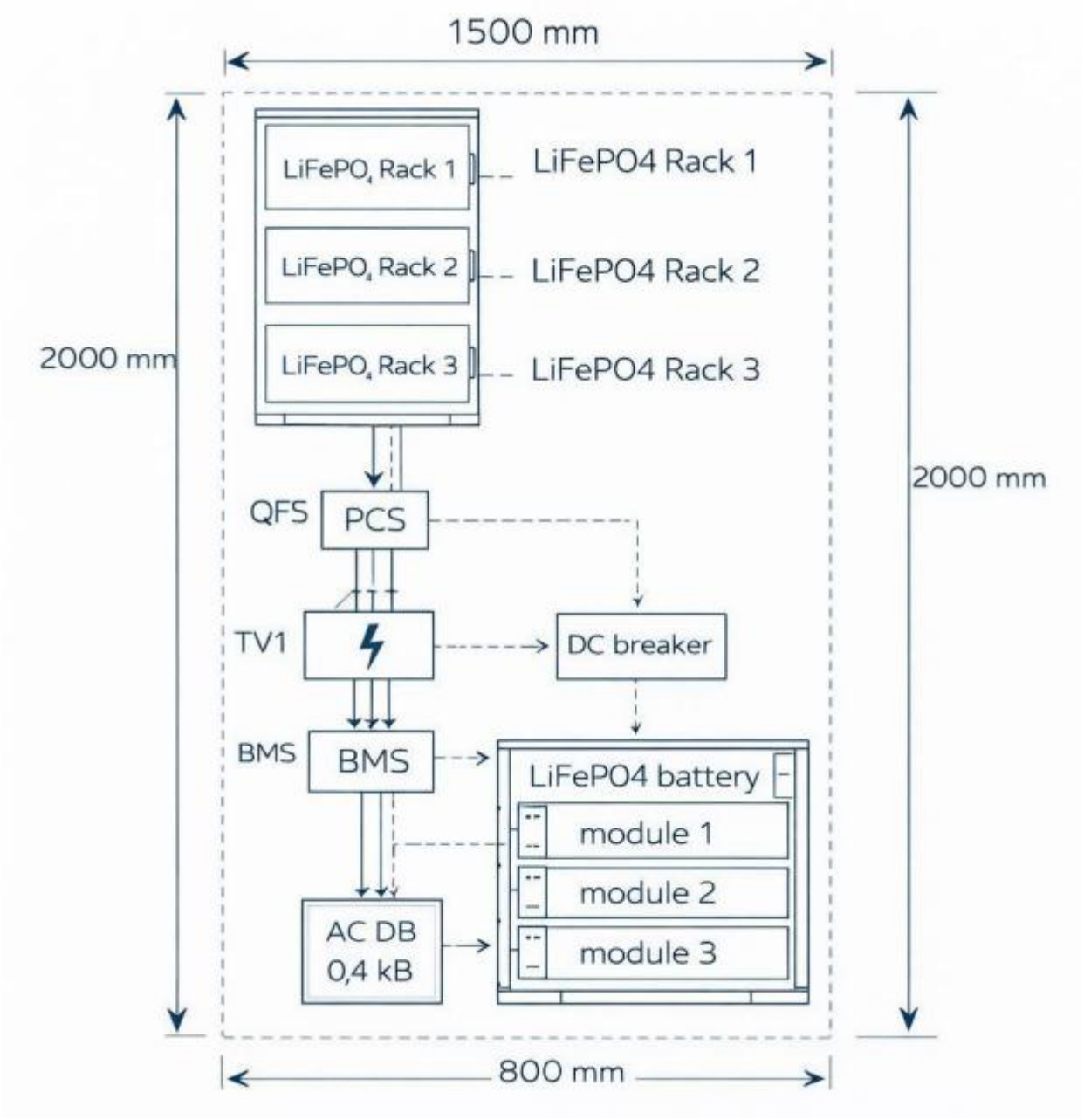


Рис. Е.1. Компоновка батарейних модулів та інвертора

Додаток Д

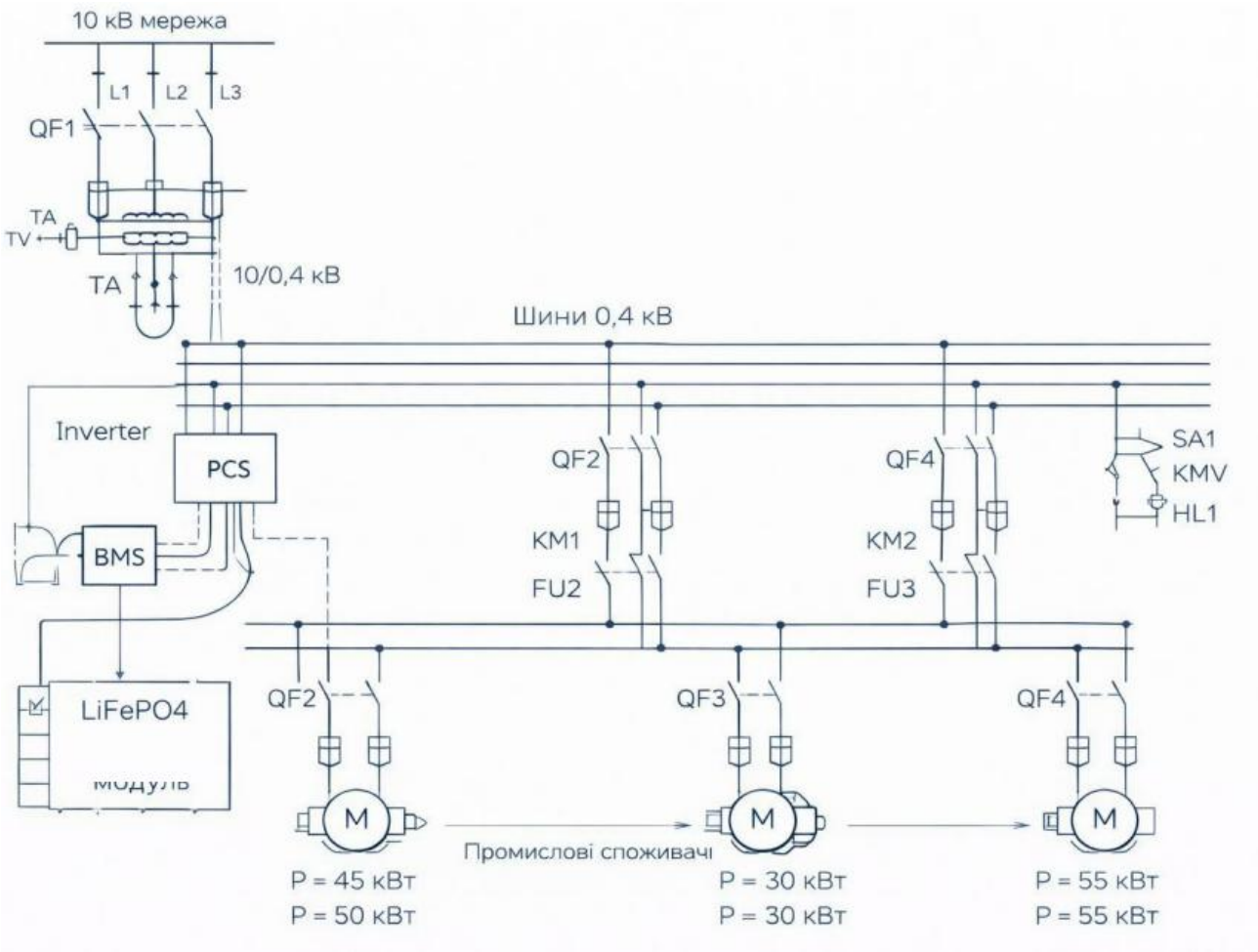


Рис. Д.1. Система електропостачання після встановлення $LiFePO_4$ акамулятора