

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

«РОЗРОБКА СИСТЕМИ РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ
КРИТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА
МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ
НА ОСНОВІ ДБЖ ТА АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ»

Виконав: здобувач вищої освіти групи ЕЕМ-22-2 Руслан СТРИЛЕЦЬ

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг
2026 р.

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**
СТРІЛЕЦЬ Руслан Валентинович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка системи резервного електроживлення критичного навантаження доменного виробництва металургійного підприємства АрселорМіттал Кривий Ріг на основі ДБЖ та акумуляторної батареї.

2. Строк подання студентом роботи червня 202 р.

3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи
Розробка, комплексне електротехнічне проєктування та техніко-розрахункове обґрунтування системи резервного електроживлення критичного навантаження засобів автоматизації та КВПіА доменного виробництва на основі джерела безперебійного живлення (ДБЖ) та літій-залізо-фосфатної акумуляторної батареї.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)
Вступ, Розділ 1 (Аналіз об'єкта та відомість навантажень КВПіА), Розділ 2 (Розрахунок потужності ДБЖ та ємності АКБ), Розділ 3 (Вибір вогнестійких кабелів і захисних апаратів Schneider Electric), Розділ 4 (Моделювання інвертора в MATLAB/Simulink), Розділ 5 (Аналіз CAPEX/OPEX, порівняння батарей та матриця ризиків), Загальні висновки, Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Лист 1 (Спрощена схема доменної печі, схема розподілу навантажень за групами критичності А, В, С та відомість навантажень КВПіА), Лист 2 (Структурна схема системи резервного живлення, принципова однолінійна схема трифазного ДБЖ Huawei UPS5000 та шафи SmartLi, схема розміщення обладнання в електротехнічному приміщенні), Лист 3 (Блок-схема режимів роботи системи, графіки моделювання динаміки потужності, ємності АКБ та селективності захисту в MATLAB/Simulink, графіки аналізу TCO, CAPEX та модель оцінки ризиків).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
II	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
III	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
IV	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
V	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Отримання завдання, вихідних даних та затвердження теми кваліфікаційної роботи	18-20 травня 2026 р.
2	Уточнення мети, об'єкта, предмета дослідження. Формування відомості критичних навантажень КВПіА доменної печі	21-23 травня 2026 р.
3	Розробка Розділу 1: комплексний аналіз доменного виробництва та ранжування споживачів за категоріями надійності ПУЕ	24-26 травня 2026 р.
4	Розробка Розділу 2: обґрунтування On-Line топології, вибір структури резервування та опис функціональних режимів роботи	24-26 травня 2026 р.
5	Виконання основних електротехнічних розрахунків: потужності ДБЖ, параметрів LiFePO4 АКБ, струмів DC-ланки та часу автономії	27 – 30 травня 2026 р.
6	Розробка Розділу 3 та 4: розрахунок вогнестійких кабельних ліній, вибір захисної апаратури Schneider Electric та моделювання в MATLAB	31 травня- 2 червня 2026 р.
7	Складання графічної частини проекту: розробка структурної, принципової однолінійної схеми ЩКН та плану розміщення обладнання	3-4 червня 2026 р.
8	Розробка Розділу 5: аналіз інвестицій (CAPEX/OPEX), MATLAB-моделювання кривих TCO, оцінка техногенних ризиків	5-6 червня 2026 р.
9	Оформлення Вступу, Загальних висновків, Списку джерел. Нормоконтроль та фінальна перевірка кваліфікаційної роботи	Дата закінчення роботи (перевірка на антиплагіат)

Дата видачі завдання _____ 202 р.

Здобувач вищої освіти _____

(підпис)

Руслан Стрілець

(Ім'я Прізвище)

Керівник роботи _____

(підпис)

Ігор ПЕРЕСУНЬКО

(Ім'я Прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Розробка системи резервного електроживлення критичного навантаження доменного виробництва металургійного підприємства АрселорМіттал Кривий Ріг на основі ДБЖ та акумуляторної батареї.»: 98 с., 22 рис., 15 літературних джерел.

Шифр роботи: ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12

Досліджуваний об'єкт - система електропостачання критичних електроприймачів Особливої групи першої категорії надійності доменного виробництва металургійного підприємства.

У першому розділі Аналіз технологічного об'єкта та критичного навантаження доменного виробництва.

У другому розділі Обґрунтування структури системи резервного електроживлення.

У третьому розділі Розрахунок параметрів ДБЖ та акумуляторної батареї.

У четвертому розділі Розробка електричної схеми, вибір кабелів, захистів і системи моніторингу.

У п'ятому розділі Техніко-економічне, експлуатаційне та безпекове обґрунтування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДЖЕРЕЛО БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ, ЛІТІЙ-ЗАЛІЗО-ФОСФАТНИЙ АКУМУЛЯТОР, КРИТИЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ, ОДНОЛІНІЙНА СХЕМА, АВТОМАТИЗАЦІЯ ДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Стрілець Р.			Реферат	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірив		Пересунько					5	99
Н. Контр.		Пересунько				КНУ гр. ЕЕМ-22-2		
Затвердж.		Пересунько І.						

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	7
1 Аналіз технологічного об'єкта та критичного навантаження доменного виробництва	
1.1 Коротка характеристика доменного виробництва як електротехнологічного об'єкта.....	10
1.2 Формування переліку критичних електроприймачів.....	13
1.3 Ранжування навантажень за критичністю.....	16
1.4 Вихідні дані для розрахунку.....	19
1.5 Вимоги до якості та безперервності живлення.....	22
2 Обґрунтування структури системи резервного електроживлення	
2.1 Порівняння варіантів резервного живлення.....	25
2.2 Вибір топології ДБЖ.....	27
2.3 Структурна схема системи.....	32
2.4 Режим роботи системи.....	35
2.5 Вибір рівня напруги та потужності системи.....	37
3 Розрахунок параметрів ДБЖ та акумуляторної батареї	
3.1 Складання розрахункової таблиці навантажень.....	39
3.2 Розрахунок потужності ДБЖ.....	42
3.3 Розрахунок часу автономної роботи.....	45
3.4 Вибір типу акумуляторної батареї.....	50
3.5 Розрахунок DC-частини.....	54
3.6 Перевірка теплового режиму та розміщення АКБ.....	57
3.7 Перевірка режимів короткого замикання та селективності...	59

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Вступ		
Розробив		Стрілець Р.					
Перевірив		Пересунько					
Н. Контр.		Пересунько					
Затвердж.		Пересунько І.			КНУ гр. ЕЕМ-22-2		
					Літ.	Арк.	Аркушів
						6	99

4	Розробка електричної схеми, вибір кабелів, захистів і системи моніторингу	
4.1	Структурна схема системи.....	64
4.2	Однолінійна схема підключення.....	67
4.3	Розрахунок і вибір кабельних ліній.....	69
4.4	Вибір апаратів захисту.....	73
4.5	Заземлення, вирівнювання потенціалів і електробезпека.....	76
4.6	Моніторинг і діагностика.....	79
5	Техніко-економічне, експлуатаційне та безпекове обґрунтування	
5.1	Порівняння варіантів системи.....	82
5.2	Оцінка вартості обладнання.....	86
5.3	Оцінка експлуатаційних витрат.....	89
5.4	Оцінка ефекту від впровадження.....	93
5.5	Обмеження проєкту.....	95
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	97
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	99

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку металургійної галузі України, зокрема її флагмана ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», проходить в умовах безпрецедентних викликів, пов'язаних із тривалою військовою агресією. Постійні руйнування критичної інфраструктури та ракетні удари по об'єктах енергетичної системи призвели до виникнення масштабних мережевих аварій і затяжних блекаутів. Для промислових підприємств із безперервним технологічним циклом, таких як доменне виробництво, раптове зникнення або глибоке падіння напруги в електричних мережах становить катастрофічну загрозу.

Доменна піч є складним об'єктом підвищеної технологічної небезпеки. Навіть короточасна втрата живлення (на кілька мілісекунд) засобів автоматизації, контрольно-вимірювальних приладів (КВПіА) та програмованих логічних контролерів (ПЛК) призводить до повної втрати контролю над ходом плавки чавуну. Наслідками таких аварійних ситуацій є «закозлення» печі, прогар фурмених зон, руйнування вогнетривкої подини, а також вибухонебезпечні викиди токсичного доменного газу в атмосферу, що загрожує життю персоналу та екології Криворізького регіону.

У цих реаліях класичні системи резервування стають неефективними, а забезпечення абсолютної надійності електропостачання Особливої групи навантажень КВПіА вимагає впровадження інноваційних автономних комплексів. Застосування сучасних трифазних On-Line систем безперебійного живлення (ДБЖ) з подвійним перетворенням енергії у поєднанні з інтелектуальними літій-залізо-фосфатними накопичувачами (LiFePO₄) дозволяє гарантувати нульовий час перемикання на резерв та тривалу автономію систем керування.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Шевченко Т.			Вступ	Літ.	Арк.
Перевірів		Пересунько					8
							99
Н. Контр.		Пересунько				КНУ гр. ЕЕМ-22-2	
Затвердж.		Пересунько І.					

Метою кваліфікаційної роботи є проектування та техніко-економічне обґрунтування модернізації системи безперебійного електропостачання комплексу КВПіА та автоматизації доменної печі в умовах високих ризиків системних аварій в енергосистемі України.

Для досягнення поставленої мети сформовано та вирішено такі завдання:

- Проаналізувати доменне виробництво як безперервний технологічний процес із підвищеними вимогами до надійності електроживлення.
- Виділити критичні електроприймачі, які мають залишатися під напругою під час аварійного зникнення основного живлення.
- Скласти таблицю навантажень із зазначенням активної потужності, коефіцієнта потужності, режиму роботи, пускових струмів і пріоритету резервування.
- Обґрунтувати структуру резервного електроживлення на основі ДБЖ та акумуляторної батареї.
- Розрахувати повну потужність ДБЖ, енергоємність акумуляторної батареї, струми DC-ланки та час автономної роботи.
- Підібрати кабельні лінії, комутаційні та захисні апарати для AC- і DC-частини системи.
- Розробити структурну та однолінійну схеми системи резервного живлення.
- Виконати порівняння варіантів акумуляторної батареї: VRLA, Li-ion або LiFePO₄.
- Підготувати техніко-економічне та експлуатаційне обґрунтування запропонованого рішення.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТА ТА КРИТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1 Коротка характеристика доменного виробництва як електротехнологічного об'єкта

Сучасний комплекс доменного виробництва металургійного підприємства «АрселорМіттал Кривий Ріг» є потужним, безперервним та високоінтенсивним електротехнологічним об'єктом із замкнутим циклом. Технологічний процес виплавки чавуну базується на відновленні залізовмісних матеріалів (агломерату, котунів) вуглецем коксу та виносними відновлюваними газами за умов високого тиску й температурного градієнта.

В інтегрованому металургійному комбінаті доменна піч є основним виробничим агрегатом, де відбувається первинне відновлення оксидних руд з отриманням рідкого чавуну, який також називають «гарячим металом». Особливість такої печі полягає у забезпеченні повного циклу усіх процесів, як основних так і допоміжних технологічних процесів від підготовки, завантаження до виплавки чавуну та шлаку. Доменна піч — це величезна сталева труба, викладена вогнетривкою цеглою, куди зверху завантажують залізну руду, кокс і вапняк, а знизу подають попередньо нагріте повітря. За екстремально високих температур приблизно 1500-2000 °С та надлишкового тиску газу сировина перетворюється на кінцевий продукт.

З інженерної точки зору доменний комплекс являє собою складну децентралізовану структуру, де взаємопов'язані системи електропривода, теплотехнічного моніторингу, газодинамічного регулювання та логічного керування.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Стрілець Р.				Розділ 1	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько						10	99
Н. Контр.	Пересунько					КНУ		
Затвердж.	Пересунько І.					гр. ЕЕМ-22-2		

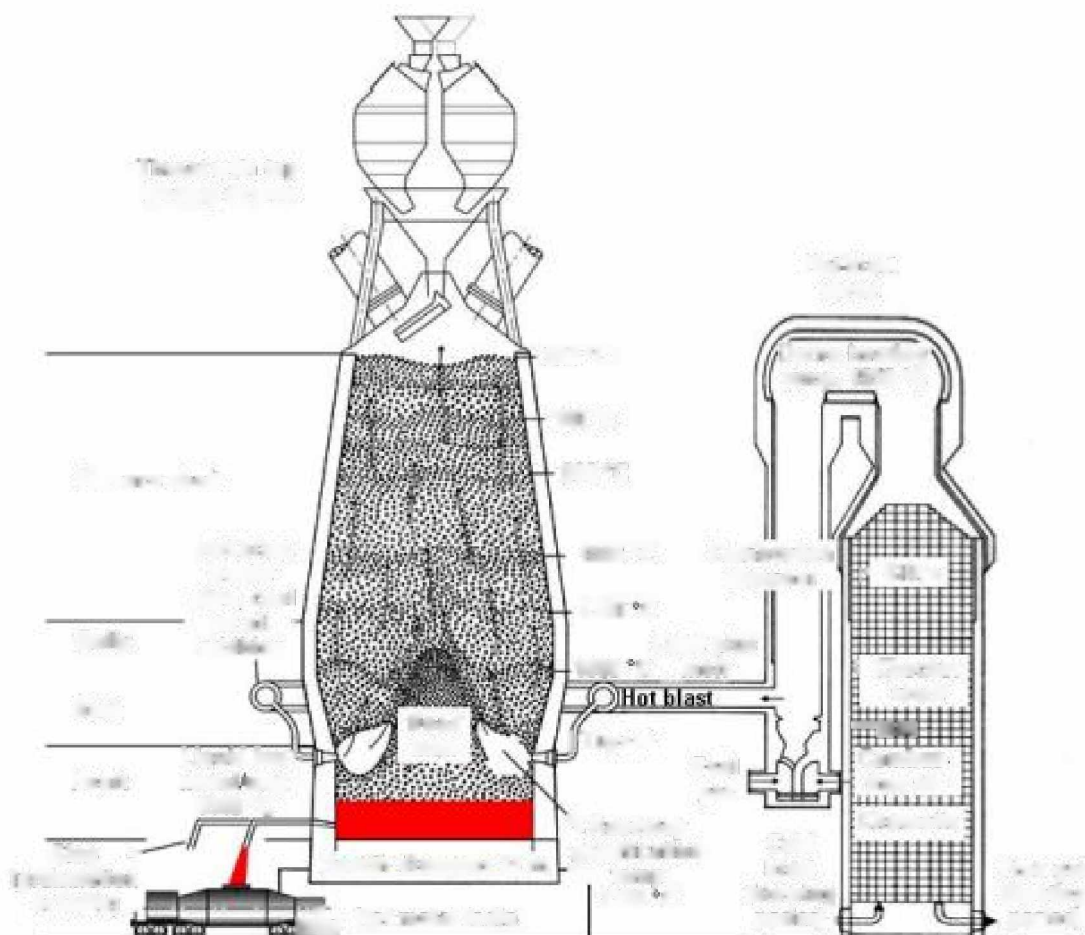


Рисунок 1.1 – Спрощена схема доменної печі (Джерело: Dr. Michael Degner et al., Steel Manual, Steel Institute VDEh, Düsseldorf, 2008.)

Безперервність, стабільність та безпека виплавки повністю визначаються надійністю функціонування таких технологічних підсистем:

- Система автоматизованого завантаження та розподілу шихти: керує роботою безконусних завантажувальних пристроїв (БЗП), конвеєрів та вагів-дозаторів, де чіткість часових інтервалів визначає профіль засипу в печі.
- Агрегати повітряного дуття та автентичні повітрянагрівачі: забезпечують подачу високотемпературного кисневого дуття під тиском, регулювання якого здійснюється швидкісними запірно-регулюючими клапанами.

- Система очищення, охолодження та відведення доменного газу: критично важливий контур, що контролює тиск під колошником печі. Будь-яке розбалансування у роботі дросельних груп або клапанів скидання газу може призвести до аварійного надлишкового тиску.
- Контур охолодження елементів печі: безперервна циркуляція хімічно очищеної води через охолоджувальні плити шахти й фурмені зони, автоматичне перемикавання насосних агрегатів та регулювання запірних засувок.

Оскільки детальні фактичні дані та внутрішні виконавчі схеми діючих промислових агрегатів підприємства є закритими або комерційною таємницею, у рамках даної кваліфікаційної роботи всі подальші техніко-економічні розрахунки, вибір структури мережі та параметрів обладнання виконуються на основі узагальненої розрахункової схеми, відкритих джерел, типових паспортних даних обладнання та припущень, прийнятих для навчального проєктування.

Відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), більшість споживачів доменного виробництва за наслідками аварійних зупинок належать до I категорії, а ключові елементи керування, КВПіА та запірна арматура безпеки до групи I категорії. Знеструмлення або навіть короткочасна посадка напруги (тривалістю понад 20–50 мс) у живильних мережах 0,4 кВ автоматизованого комплексу викликає ланцюгову реакцію: перезавантаження програмованих логічних контролерів (ПЛК) центрального процесорного рівня, втрату зв'язку зі SCADA-системами, знеструмлення електромагнітних клапанів та перехід виконавчих механізмів у неконтрольований стан, що унеможлиблює швидку локалізацію аварійної ситуації.

Особливістю металургійного виробництва в умовах сучасного стану Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України є робота в умовах підвищеного ризику раптових глибоких посадок напруги, динамічних

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коливань частоти та аварійних відключень ліній. Внутрішнє середовище цехів характеризується високим рівнем струмопровідного пилу (графіт, коксовий пил) та підвищеною вологістю.

Традиційні схеми резервування, що базуються на автоматичному ввімкненні резервного живлення (АВР) від суміжного трансформатора або запуску дизель-генераторних установок (ДГУ), мають безживний інтервал (від 0,1 с для АВР до кількох хвилин для ДГУ). Для мікропроцесорної техніки КВПіА та електроприводів швидкісних засувки такий інтервал є критичним.

Для виключення безживного інтервалу виникає технічна необхідність впровадження джерел безперебійного живлення (ДБЖ). Застосування модульних інтелектуальних систем ДБЖ від компанії Huawei є найбільш раціональним рішенням на прикладі доменного виробництва металургійного підприємства «АрселорМіттал Кривий Ріг». Воно повинно гарантувати повну гальванічну розв'язку від нестабільної зовнішньої мережі, стабілізацію амплітуди і частоти напруги. Забезпечує нульовий час перемикання ($t_{\pi} = 0$) на автономну роботу від батарей при глибоких аваріях в енергосистемі, що дозволяє безпечно виконати технологічний регламент аварійної зупинки.

1.2 Формування переліку критичних електроприймачів

Перед системним проєктуванням автономного джерела живлення в межах узагальненої схеми доменного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» недостатньо просто обрати високу категорійність об'єкта, а необхідно виконати чітку інженерну сегрегацію всіх наявних електроприймачів. Весь комплекс технологічного обладнання доменної печі за своїм впливом на безпеку та безперервність процесу в моєму проєкті розподіляється на три окремі функціональні групи. Дозволяє оптимізувати габарити й вартість проєктованої системи ДБЖ і акумуляторної батареї.

Перша група (Абсолютно критичні споживачі):

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

У першій групі споживачі потребують миттєвого резервування з нульовим часом перемикавання, як я зазначав в попередньому підпункті навіть секундне знеструмлення веде до повної втрати контролю над агрегатом. До цієї групи відношу мікропроцесорну техніку, засоби автоматизації, зв'язку та виконавчі механізми, знеструмлення яких призводить до повної втрати контролю над агрегатом або унеможлиблює виконання операцій безпеки. Вони потребують гарантованого живлення з нульовим часом перемикавання:

1. *Програмовані логічні контролери (PLC):* центральні процесорні модулі шаф автоматики, модулі віддаленого вводу/виводу сигналів, які здійснюють логіко-програмне керування та протиаварійний захист.
2. *Диспетчерський рівень (SCADA):* сервери бази даних, АРМ (автоматизовані робочі місця) операторів-технологів, мережеві комутатори промислових мереж (Ethernet/Profinet).
3. *Елементи КВПіА:* первинні аналогові та дискретні датчики тиску газу, температури футеровки та охолоджувальної води, витратоміри, системи газоаналізу (контроль вмісту CO , CO^2 , H_2).
4. *Локальні електроприводи запірної та регулюючої арматури:* електромеханічні приводи відсічних клапанів, шиберів та засувок, що задіяні в алгоритмах локалізації аварійних ситуацій.
5. *Аварійна сигналізація та зв'язок:* системи гучномовного зв'язку, диспетчерські селектори, шафи світлозвукової сигналізації про технічні порушення.

Друга група (Допоміжні механізми з умовним резервуванням):

До другої групи споживачів я пропоную віднести механізми цеху, які безпосередньо не керують протиаварійним захистом. Тривале безживне функціонування яких погіршує загальний стан об'єкта. Їх включення до контуру живлення від ДБЖ допускаю лише після детального розрахунку енергетичного балансу та перевірки перевантажувальної здатності інвертора:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

1. *Малопотужні вентилятори охолодження:* пристрої примусової вентиляції всередині самих шаф із ПЛК та силовими перетворювачами для запобігання термічного перегріву електроніки.
2. *Електроприводи допоміжних засувок загального призначення:* арматура на допоміжних трубопроводах, час закриття яких не є критичним і може становити кілька хвилин.
3. *Локальне чергове освітлення:* світлодіодні світильники в зоні головного поста керування, необхідні для забезпечення видимості персоналу при використанні ручних органів керування.

Третя група (Потужні технологічні механізми):

У III групу відношу потужні високовольтні та низьковольтні електромеханізми доменного виробництва з великою встановленою потужністю та значними пусковими струмами. Живлення від локального ДБЖ є технічно неможливим та економічно недоцільним, оскільки призведе до критичного подорожчання і збільшення габаритів системи. На мою думку для третьої групи потрібно використовувати потужні дизель-генераторні установки, тоді як завданням мого проєкту на базі ДБЖ залишається надійне утримання під напругою саме першої групи та обґрунтованої частини другої для збереження керованості та безпеки об'єкта під час тривалого блекауту:

1. *Насоси оборотного циклу водоохолодження:* потужні електродвигуни (від десятків до сотень кВт), що забезпечують циркуляцію води через охолоджувальні плити печі.
2. *Електроприводи скіпових підйомників або головних завантажувальних конвесрів:* важкі електроприводи рудопідготовки та подачі матеріалів.
3. *Потужні вентиляційні системи та димососи аспіраційних установок:* високовольтні або низьковольтні двигуни великої потужності для очищення повітря ливарного двору.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Я вважаю об'єктом безпосереднього інженерного проектування та розрахунку в даній роботі є локальна система ДБЖ виключно для споживачів **I групи**, що дозволяє обрати раціональне рішення.

1.3 Ранжування навантажень за критичністю

Для реалізації раціональної схеми цеху розподілу електроенергії 0,4 кВ та оптимізації потоків потужності в аварійних режимах, усі споживачі системи автоматизації та допоміжного обладнання підлягають жорсткому ранжуванню. Враховую специфічність процесу безперервного процесу доменної печі і вимог ПУЕ по категорія навантаження.

Оскільки проектування виконується на прикладі доменного виробництва металургійного підприємства «АрселорМіттал Кривий Ріг» на основі узагальненої схеми та припущень прийнятих для навчального, розподіл навантажень доцільно виконати за трьома інженерними категоріями: А, В та С. Думаю такий підхід дозволить визначити межі проєктованої системи і не перевантажувати її й мати запас по потужності.

Категорія А — Безперервне живлення від ДБЖ (Абсолютний пріоритет): До цієї категорії відносяться мікропроцесорні пристрої та виконавчі механізми, для яких будь-яка безживна пауза є критичною і призводить до збою в алгоритмах керування.

- *Склад споживачів:* Центральні процесорні блоки програмованих логічних контролерів (PLC), сервери SCADA-системи, промислові мережеві комутатори, первинні датчики контролю параметрів плавки (КВПіА), системи диспетчерського зв'язку та швидкісні електроприводи запірної арматури безпеки.
- *Схема живлення:* Електроприймачі цієї групи виділяються на окрему ізольовану шину розподілу Щит критичних навантажень (ЩКН). Для забезпечення безперервності технологічних контурів безпеки, живлення

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

цієї шини в нормальному та аварійному режимах має здійснюватися через локальну систему джерела безперебійного живлення (ДБЖ). У рамках даної роботи для забезпечення найвищої готовності передбачено інтеграцію інтелектуальних систем безперебійного живлення компанії Huawei.

Категорія В — Живлення від аварійної секції резервного джерела (Середній пріоритет): Сюди входять споживачі, знеструмлення яких у момент аварії є допустимим на час, необхідний для автоматичного спрацювання загальноцехової автоматики резервування.

- *Склад споживачів:* Аварійне світлодіодне освітлення постів керування та диспетчерських пунктів, локальні вентилятори примусового охолодження шаф із силовими платами, приводи допоміжних засувки загальноцехового призначення.
- *Схема живлення:* Зазначені споживачі підключаються до секції аварійного живлення низьковольтного розподільного пристрою (ВРП-0,4 кВ) цеху. При зникненні напруги на основному вводі, ця секція автоматично перемикається на резервний трансформатор за допомогою пристроїв автоматичного введення резерву (АВР), або заживлюється після запуску цехової дизель-генераторної установки (ДГУ). Включення цих споживачів до контуру живлення від ДБЖ є недоцільним, оскільки це призведе до невиправданого розряду акумуляторів струмами невиробничого призначення.

Категорія С — Технологічно важливі, але не призначені для живлення від ДБЖ (Нижчий пріоритет у контурі безперебійності): До цієї категорії відносяться потужні силові електроприймачі, які безпосередньо забезпечують виконання основного металургійного процесу в нормальному режимі, але мають значну встановлену потужність.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

- *Склад споживачів:* Насосні агрегати оборотного циклу водоохолодження, електроприводи скіпових підйомників, двигуни конвеєрів рудопідготовки, потужні вентиляційні системи аспіраційних установок.
- *Схема живлення:* Живлення здійснюється безпосередньо від цехових трансформаторних підстанцій 6/0,4 кВ. При глибоких аваріях в енергосистемі та тривалому безживній паузі ці агрегати зупиняються. Живлення таких важких споживачів від ДБЖ є технічно неможливим через колосальні пускові струми, які б вимагали збільшення потужності ДБЖ у десятки разів. Безпека процесу забезпечується тим, що ДБЖ системи Huawei (Категорія А) утримує в роботі контролери та датчики, які фіксують зупинку силових агрегатів і коректно перекладають технологічний комплекс у безпечний стан очікування.

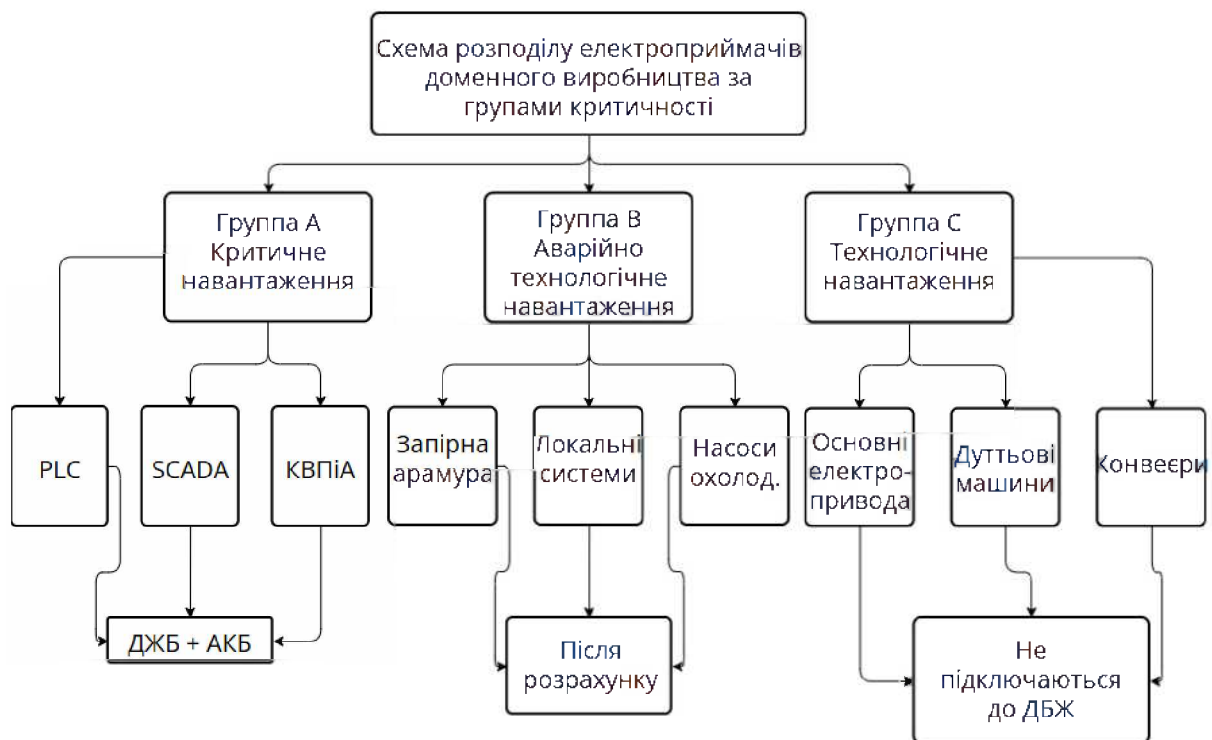


Рисунок 1.2 - Схема розподілу навантажень за групами критичності А, В, С.

На мій погляд, таке ранжування навантаження обладнання виходить максимально практичним та доцільним для мого проєкту. Воно дозволяє чітко

обґрунтувати, чому система ДБЖ розраховується тільки під категорію А, і не роздувати проєкт зайвими витратами.

1.4 Вихідні дані для розрахунку

Для проведення подальших електротехнічних та акумуляторних розрахунків необхідно детально визначити та систематизувати вихідні параметри навантажень категорії А (абсолютного пріоритету). Оскільки детальні специфікації конкретних діючих агрегатів є закритими, у даному навчальному проєкті технічні параметри електроприймачів приймаю на основі відкритих джерел, типових паспортних даних сучасного промислового обладнання автоматизації та припущень безперервного доменного процесу.

Для кожного критичного споживача задаються такі базові електричні та експлуатаційні характеристики:

1. *Номинальна активна потужність* ($P_{\text{ном}}$, кВт): чисте активне споживання мікропроцесорних плат, серверів та нагрівальних елементів датчиків.
2. *Коефіцієнт потужності* ($\cos\phi$): визначає співвідношення між активною та повною потужністю, що є критичним для розрахунку силових кіл ДБЖ.
3. *Режим роботи*: тривалий (для контролерів та датчиків) або короткочасний/повторно-короткочасний (для приводів арматури).
4. *Коефіцієнт пускового струму* ($k_{\text{пуск}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$): враховує динамічні кидки струму під час запуску електродвигунів засувки.
5. *Тривалість роботи в аварійному режимі* ($t_{\text{авт}}$, хв): згідно з вимогами технологічного регламенту безпечного утримання процесу, прийнята рівною 60 хвилин (1 година).
6. *Пріоритет резервування*: відображає черговість або обов'язковість безперервного живлення в контурі автоматики.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Вихідні паспортні дані критичного навантаження (Категорія А)

Таблиця 1.1

№	Найменування критичного навантаження	К-сть	Рном одного, Вт	Сумарна Рном, Вт	cos ф	Режим роботи	кпуск	Час автономі ї тавт, хв	Пріоритет
1	PLC-контролери (промислові шафи автоматики)	4	350	1400	0,90	Тривалий	1,0	60	I (Найвищий)
2	Сервери та SCADA-станції операторів	2	800	1600	0,95	Тривалий	1,0	60	I (Найвищий)
3	Комутатори та промислове мережеве обладнання	4	150	600	0,90	Тривалий	1,0	60	I (Найвищий)
4	Комплекс систем КВПіА (блоки живлення датчиків)	1	1500	1500	0,85	Тривалий	1,0	60	I (Найвищий)
5	Системи диспетчерського та гучномовного зв'язку	1	500	500	0,90	Тривалий	1,0	60	I (Найвищий)
6	Система аварійної газової та пожежної сигналізації	1	400	400	0,95	Тривалий	1,1	60	I (Найвищий)
7	Шафи керування НКУ та релейного захисту	4	300	1200	0,85	Тривалий	1,0	60	I (Найвищий)
8	Електроприводи швидкодіючої запірної арматури	4	1500	6000	0,80	Короткочасний	3,5	60	I (Найвищий)
9	Аварійне світлодіодне освітлення операторної та щитової	20	30	600	0,95	Тривалий	1,0	60	I (Найвищий)
-	РАЗОМ споживачів категорії А:	-	-	13800	0,86 (ср)	-	-	60	-

Разом потужність:

$$P_{\Sigma} = 13800 \text{ Вт} = 13,8 \text{ кВт}$$

У результаті комплексного аналізу технологічного об'єкта та ранжування навантажень є підсумкова узагальнена матриця розподілу споживачів доменного виробництва за групами критичності (таблиця 1.3). Вона визначає межі проектування системи безперебійного живлення та фіксує прийняту базову розрахункову активну потужність системи на рівні $P_{\Sigma} = 13,8 \text{ кВт}$

Матриця розподілу та обґрунтування резервування навантажень доменного виробництва

Таблиця 1.2

Група навантаження	Приклади обладнання	Чи жити від ДБЖ	Пояснення та інженерне обґрунтування
А. Безперервне критичне навантаження	PLC, сервери SCADA, комутатори, КВПіА, диспетчерський зв'язок, пожежна/аварійна сигналізація, шафи РЗА, електроприводи арматури, аварійне освітлення.	Так	Потребують живлення без перерви з нульовим часом перемикання ($t_p = 0$). Будь-яка безструмова пауза означає миттєвий збій алгоритмів ПЛК, повну втрату контролю над печею та пряму загрозу системної аварії.
В. Аварійне технологічне навантаження	Гідравлічні маслостанції приводів засувки та пушок випуску чавуну, аварійні насоси систем локального охолодження та хімічного водоочищення, кондиціонери серверних.	Після розрахунку	Механізми утримують піч у безпечному стані. Мають технологічну чи гідравлічну інерцію і здатні витримати паузу в кілька хвилин до запуску ДГУ або спрацювання цехового АВР. Живлення від ДБЖ визначається після перевірки пускових струмів.
С. Потужне технологічне навантаження	Високовольтні насоси головного оборотного контуру, електродвигуни скіпових підйомників, приводи конвеєрів шихтоподачі, димососи кауперів.	Ні (або окреме джерело)	Обладнання споживає сотні кВт або МВт для забезпечення плану виплавки. Резервування від ДБЖ/АКБ є технічно неможливим і економічно не виправданим. При блек-ауті зупиняється завжди, а піч переводять у режим "тихого ходу".

1.5 Вимоги до якості та безперервності живлення

Для забезпечення стабільної та безаварійної роботи виділеної групи критичних споживачів категорії А на прикладі доменного виробництва металургійного підприємства «АрселорМіттал Кривий Ріг», до проекрованої системи резервного електроживлення висуваються жорсткі нормативно-технічні вимоги. До якості електроенергії для критичних навантажень висуваються підвищені вимоги. Перерва живлення PLC-контролерів, серверів SCADA, мережевого обладнання та систем КВПіА навіть на короткий час може призвести до втрати даних, зупинки процесів керування або порушення технологічного режиму.

Відповідно до міжнародних стандартів (зокрема ІЕС 62040-3) та галузевих норм електробезпеки, вихідна напруга на шинах Щита критичних навантажень (ЩКН) повинна характеризуватися строго нульовим часом перемикання на автономне джерело (t_n), оскільки мікропроцесорні модулі PLC та SCADA-сервери вкрай чутливі до безструмових пауз понад 10–20 мс і відповідають на них системним перезавантаженням із повною втратою контролю над об'єктом. Якість генерованої інвертором електроенергії має забезпечувати високу точність стабілізації напруги (статична похибка в межах $\pm 1\% \dots \pm 2\%$) та підтримання частоти на рівні 50 Гц із девіацією не більше $\pm 0,1$ Гц. Форма кривої вихідної напруги повинна бути чистою синусоїдою з коефіцієнтом нелінійних спотворень ($THDu$) менше 5 % для виключення паразитного перегріву магнітопроводів шаф керування і релейного захисту, а розрахунковий час автономної роботи від акумуляторів має складати $t_{авт} = 60$ хв для гарантованого переведення печі у безпечний режим "тихого ходу".

- Перші 10–15 хвилин йдуть на автоматичне протиаварійне відсікання газів, спрацювання арматури та збір аварійних трендів SCADA.
- Наступні 45 хвилин є технологічним регламентним запасом часу для безпечної евакуації персоналу зі шкідливих зон (газова безпека) та очікування команди на запуск або відновлення альтернативних ліній живлення комбінату.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Обґрунтування вибору технології ДБЖ:

Для задоволення перелічених вимог у промислових умовах із високим рівнем завад єдиним технічно обґрунтованим рішенням є вибір джерела безперебійного живлення топології On-Line (із подвійним перетворенням енергії). В ДБЖ такого типу вхідна змінна напруга мережі спочатку випрямляється у постійну, очищується від високочастотних імпульсів і шумів, а потім за допомогою інвертора знову перетворюється на ідеальну синусоїдальну змінну напругу. Акумуляторна батарея підключена безпосередньо до внутрішньої DC-шини постійного струму. У разі повного зникнення зовнішньої напруги, інвертор миттєво продовжує живити навантаження енергією з батареї, забезпечуючи фізичний нульовий час перемикання.

Необхідність статичного байпасу:

Обов'язковою інженерною вимогою до промислової системи є наявність автоматичного статичного (електронного) та сервісного (ручного) байпасу у структурі ДБЖ. Статичний байпас забезпечує миттєве перемикання критичного навантаження напряму на обхідну лінію зовнішньої мережі без перерви в живленні у випадках тривалих струмових перевантажень інвертора (в моменти пуску приводів запірної арматури з кратністю приблизно $k_{\text{пуск}} = 3,5$) або при виникненні внутрішніх апаратних збоїв самого ДБЖ. Сервісний байпас дозволяє повністю знеструмити силові плати ДБЖ для проведення періодичного технічного обслуговування чи ремонту модулів без зупинки живлення контролерів PLC та комплексів КВПіА доменного виробництва.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Висновок до 1 розділу

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено комплексний аналіз доменного виробництва металургійного підприємства «АрселорМіттал Кривий Ріг» як безперервного і електротехнологічного об'єкта. Дослідження підтвердило критичну важливість безперервного електропостачання для доменного комплексу, де будь-яке раптове та неконтрольоване знеструмлення контурів автоматизації несе пряму загрозу життю персоналу через ризик витоку токсичного доменного газу, загрожує аварійним пошкодженням дорогого обладнання внаслідок прогару охолоджувальних елементів шахти, а також призводить до повної втрати керованості процесом плавки.

З метою оптимізації капітальних витрат і виключення технічно невиправданого роздування встановленої потужності проєктованої системи, було виконано жорстке інженерне ранжування всіх цехових електроприймачів за трьома групами критичності. Це дозволило чітко довести доцільність впровадження системи безперебійного живлення виключно для споживачів категорії А, які забезпечують працездатність контурів протиаварійного захисту та збору даних.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Розділ 2

ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

2.1 Порівняння варіантів резервного живлення

Для забезпечення надійної роботи критичного навантаження категорії А доменного комплексу, розрахункова активна потужність якого становить 13,8 кВт із часом автономії 60 хвилин, необхідно розробити та обґрунтувати оптимальну концепцію системи резервного електропостачання. Існує кілька підходів до організації технологічного резерву на рівні напруги 0,4 кВ. Кожне з цих рішень має свої техніко-економічні обмеження, експлуатаційні особливості, а також різний рівень динамічної готовності при виникненні аварійних ситуацій.

Після визначення складу критичного навантаження необхідно вибрати спосіб його резервування. На перший погляд завдання здається простим -- достатньо встановити резервне джерело живлення. Насправді ж для доменного виробництва важливим є не лише сам факт наявності резерву, а й швидкість його введення в роботу, тривалість автономного режиму та економічна доцільність впровадження.

З метою вибору найбільш раціонального варіанта для умов доменного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», проведено порівняльний аналіз п'яти альтернативних інженерних конфігурацій:

1. ДБЖ зі стандартною (вбудованою) АКБ невеликої ємності.
2. ДБЖ із зовнішньою АКБ збільшеної ємності (масштабована система).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 2		
Розробив	Стрілець Р.						
Перевірів	Пересунько						
Н. Контр.	Пересунько						
Затвердж.	Пересунько І.				КНУ гр. ЕЕМ-22-2		
					Літ.	Арк.	Аркушів
						25	99

3. ДБЖ у поєднанні з аварійною дизель-генераторною установкою (ДГУ).
4. Промислова система накопичення енергії (BESS) на базі інтелектуальної системи керування EMS.
5. Організація окремої аварійної секції 0,4 кВ цехового ВРП без використання хімічних джерел струму.

Порівняльний аналіз варіантів побудови системи резервного живлення

Таблиця 2.1

Варіант конфігурації	Технічні переваги	Експлуатаційні та економічні недоліки	Доцільність застосування у даному проєкті
1. ДБЖ без збільшеної АКБ (стандартне виконання)	Проста і компактна структура; мінімальні капітальні витрати; швидке впровадження; нульовий час перемикання ($t_{\text{п}} = 0$).	Вкрай обмежений час автономії (зазвичай 5–10 хв), що є абсолютно недостатнім для важкого доменного процесу.	Розглядається як базовий (вихідний) варіант, але відхиляється через невідповідність вимогам регламенту автономії (60 хв).
2. ДБЖ + зовнішня АКБ (збільшена ємність)	Нульовий час перемикання ($t_{\text{п}} = 0$); гнучкість масштабування; гарантоване забезпечення 60 хв автономії; відсутність рухомих частин і вихлопних газів; висока надійність.	Потребує детального розрахунку параметрів DC-ланки; необхідність виділення площі під батарейні шафи; жорсткі вимоги до мікроклімату.	Основний рекомендований варіант. Повністю покриває вимоги щодо безперервності та часу автономії для критичного навантаження 13,8 кВт.
3. ДБЖ + дизель-генератор (ДГУ)	Потенційно необмежений час автономії (визначається запасом палива); можливість паралельного живлення споживачів категорії В.	Наявність безструмової паузи при запуску ДГУ (від 30 с до 2 хв); високі експлуатаційні витрати; паливне господарство; шум і викиди.	Можна вказати як перспективне доповнення на майбутнє для розширення системи, але як самостійне рішення для категорії А є надлишковим.
4. Промислова система BESS	Висока масштабованість; інтелектуальний моніторинг; можливість інтеграції в загальнозаводську систему керування енергією (EMS).	Колосальна вартість обладнання; надлишкова складність інтеграції та обслуговування для локального навантаження 13,8 кВт.	Недоцільно. Капітальні інвестиції у систему BESS для навантаження малої та середньої потужності є економічно невиправданими.
5. Тільки аварійна секція 0,4 кВ (без ДБЖ/АКБ)	Низька вартість реалізації; ідеально підходить для живлення важких і потужних двигунів категорій В та С.	Присутній час перемикання цехового АВР (1–3 с), що призводить до повного збою мікропроцесорної техніки та контролерів PLC.	Недоцільно. Цей варіант самостійно не здатний замінити ДБЖ для споживачів групи А, оскільки не забезпечує безперервності.

Спираючись на дані порівняльного аналізу, можна зробити однозначний висновок, що для безперервних малих і середніх критичних навантажень систем промислової автоматизації та КВПіА найбільш технічно доцільною та економічно обґрунтованою є система ДБЖ із зовнішньою акумуляторною батареєю збільшеної ємності (Варіант 2).

Вона забезпечує фізичну відсутність паузи при переході на резерв, ізолюючи чутливі контролери від збурень у загальній електромережі цеху. При цьому, на відміну від варіантів із ДГУ або BESS, це економічно і конструктивно вигідно, забезпечуючи стабільну автономну роботу контурів безпеки доменної печі протягом заданих 60 хвилин за рахунок раціонально розрахованого хімічного накопичувача енергії.

2.2 Вибір топології ДБЖ

Ефективність та надійність функціонування системи резервного електроживлення критичних споживачів безпосередньо залежить від внутрішньої архітектури (топології) джерела безперебійного живлення. Сучасна класифікація промислових та комерційних ДБЖ відповідно до стандарту IEC 62040-3 виділяє три основні класи систем: пасивного резерву (Offline), лінійно-інтерактивні (Line-Interactive) та з подвійним перетворенням енергії (Online або Double Conversion). Кожна відрізняється, має унікальні характеристики взаємодії з первинною мережею. Різна якість генерації вихідної напруги.

Джерела безперебійного живлення топології Offline

Найпростіші пристрої. У нормальному режимі роботи вони транслюють напругу з вхідної мережі безпосередньо на навантаження, виконуючи лише грубу пасивну фільтрацію високовольтних імпульсів. Перехід на роботу від акумуляторної батареї відбувається лише тоді, коли вхідна напруга виходить за жорстко встановлені критичні межі або зникає повністю. Головними недоліками цієї топології є наявність безструмової паузи під час перемикання

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

на АКБ (тривалістю від 4 до 12 мс) та апроксимована (ступінчаста) форма вихідної синусоїди при роботі від інвертора.

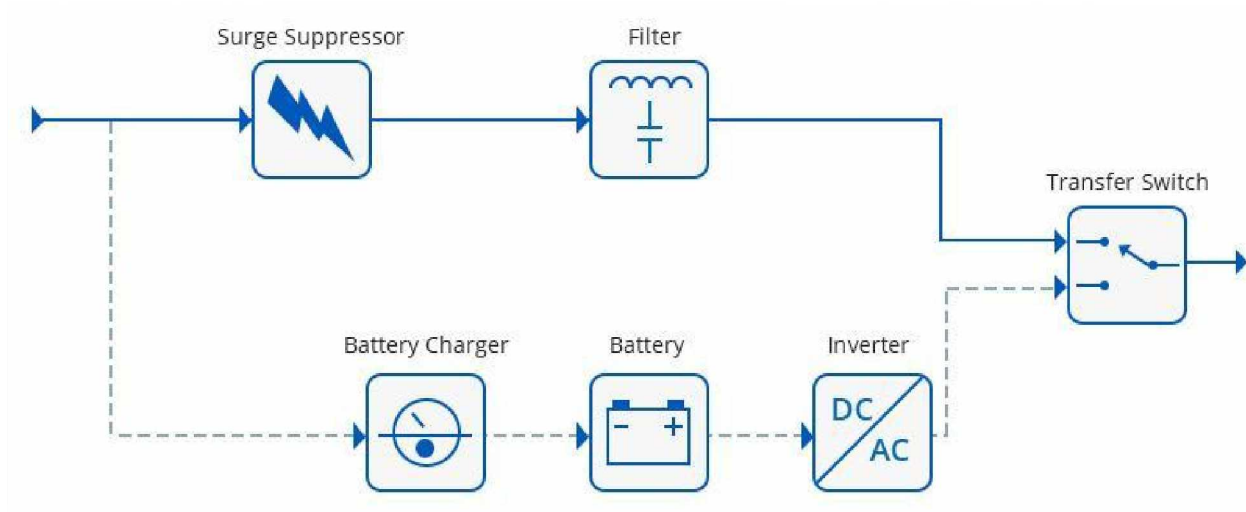


Рисунок 2.1- Спрощений вигляд ДБЖ Offline

Джерела безперебійного живлення топології Line-Interactive

Трохи складніша структура, яка доповнена ступінчастим автотрансформатором на базі релейних або напівпровідникових комутаторів (блоком AVR — автоматичного регулятора напруги). Це дозволяє пристрою стабілізувати амплітуду вхідної напруги в певних межах без переходу на акумулятор, що суттєво заощаджує ресурс батарей. Проте лінійно-інтерактивні ДБЖ також мають комерційні обмеження: час перемикання на роботу від АКБ хоч і менший, але все одно становить 2–6 мс. Крім того, пристрої цього класу не здатні коригувати відхилення частоти вхідної мережі та мають обмежені можливості фільтрації вищих гармонік струму, що генеруються потужним суміжним обладнанням цеху.

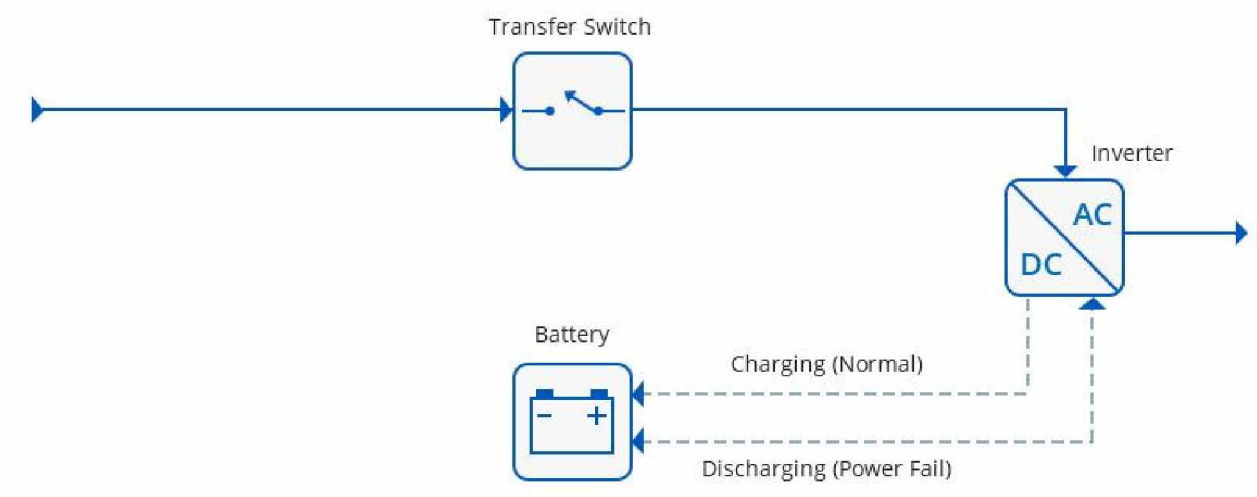


Рисунок 2.2- Спрощений вигляд ДБЖ Line-Interactive

Джерела безперебійного живлення топології Online (із подвійним перетворенням)

Більш складна логіка роботи. Вхідна змінна напруга промислової мережі спочатку надходить на силовий випрямляч, де перетворюється на постійний струм. Цей струм живить внутрішню DC-шину системи, від якої одночасно зарядка акумуляторний блок і отримує живлення силовий інвертор. Інвертор виконує зворотне перетворення постійного струму в змінний, заново генеруючи ідеальну синусоїду з прецизійною точністю стабілізації амплітуди та частоти. Акумуляторна батарея постійно підключена до DC-ланки, тому при зникненні напруги на вході ДБЖ енергія на інвертор починає миттєво надходити з АКБ без затримки.

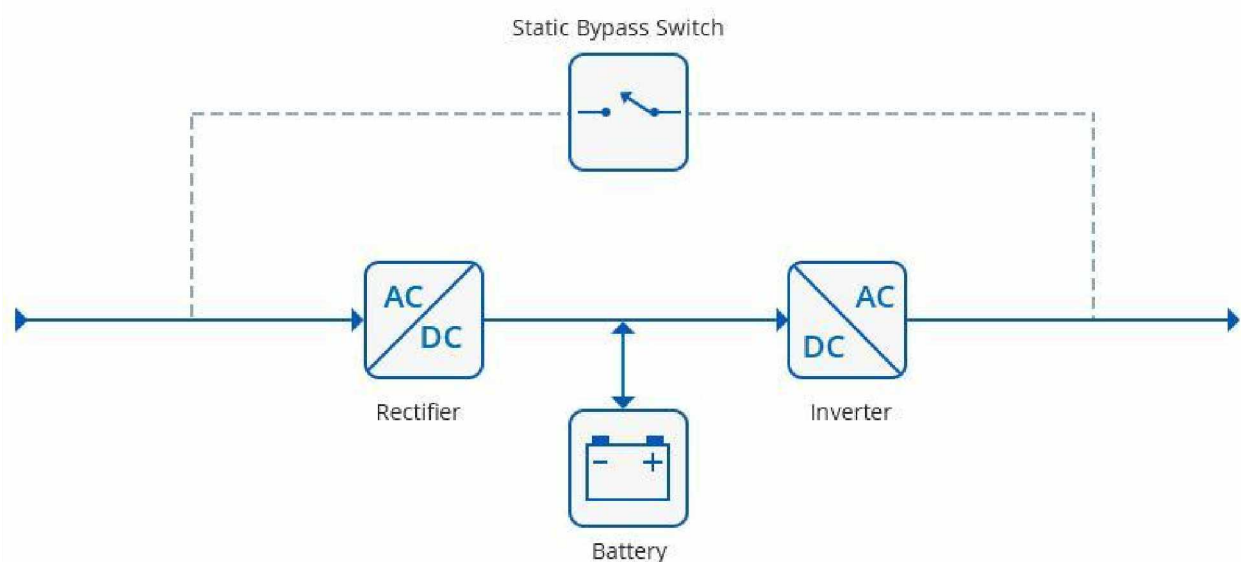


Рисунок 2.3- Спрощений вигляд ДБЖ Online

З метою обґрунтування вибору топології для навантаження 13,8 кВт доменного виробництва, виконано порівняльний аналіз технічних параметрів трьох архітектур, наведений у таблиці 2.2.

Порівняльний інженерний аналіз топологій ДБЖ

Таблиця 2.2

Технічний параметр	Топологія Offline	Топологія Line-Interactive	Топологія Online
Час перемикання на АКБ	4 – 12 мс	2 – 6 мс	Строго 0 с (безперервно)
Форма вихідної напруги від АКБ	Апроксимована синусоїда	Чиста або квазісинусоїда	Ідеальна чиста синусоїда
Точність стабілізації напруги	Відсутня (залежить від мережі)	$\pm 5\% \dots \pm 10\%$	Висока ($\pm 1\% \dots \pm 2\%$)
Стабілізація частоти	Відсутня	Відсутня	Повна ізоляція (50 Гц)
Захист від вищих гармонік та завад	Мінімальний (пасивний)	Середній	Максимальний (повна фільтрація)
Знос акумуляторної батареї	Високий	Середній	Мінімальний (завдяки DC-шині)

Для промислового критичного навантаження категорії А доменного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» єдиним технічно допустимим рішенням є застосування On-Line ДБЖ подвійного перетворення. Цей вибір

аргументується фізичною відсутністю паузи при переході на автономний режим розряду АКБ та повною електромагнітною ізоляцією мікропроцесорної техніки від цехових завад. У даному проектуванні як базову технологічну платформу обрано трифазні джерела безперебійного живлення компанії Huawei, зокрема лінійку модульних On-Line ДБЖ серії UPS5000, яка розроблена спеціально для важких умов металургійної промисловості.



Рисунок 2.4 — Промислове модульне джерело безперебійного живлення On-Line типу серії Huawei UPS5000

На мою думку головним аргументом на користь інтеграції обладнання Huawei є впровадження інтелектуальної модульної архітектури з підтримкою режиму "гарячої заміни" (Hot-Swappable) силових блоків. Це дозволяє виконувати сервісне обслуговування або заміну модулів без переведення критичного навантаження ПЛК на лінію байпасу, зберігаючи режим подвійного перетворення енергії безперервно та підвищуючи коефіцієнт готовності системи до 99,999 %. Одночасно з цим, в On-Line режимі інвертори Huawei досягають надвисокого коефіцієнта корисної дії на рівні 96–97 %, що

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

мінімізує постійні експлуатаційні витрати на власні потреби системи та суттєво знижує тепловиділення в замкнутому просторі електрощитової доменного цеху. Інверторний комплекс Huawei адаптований до специфіки металургійних мереж і здатний стабільно працювати без переходу на акумуляторну батарею при глибоких провалах лінійної напруги аж до мінус 40 %, що виключає зайвий знос АКБ під час пусків сусідніх потужних агрегатів.

2.3 Структурна схема системи

Для практичної реалізації розробленої концепції безперебійного електропостачання сформовано чітку ієрархічну структуру розподілу енергії, яка визначає логічний рух потужності від цехових джерел до кінцевих споживачів доменної печі (рисунок 2.2). Первинною точкою живлення проєктованого комплексу є основна секція технологічного розподілу цеху — мережа напругою 0,4 кВ із номінальними параметрами змінної трифазної напруги 400 В та частоти 50 Гц. На межі входу системи безперебійного живлення передбачається встановлення ввідного автоматичного вимикача. Цей апарат виконує функцію базового захисту вхідних кабельних ліній та внутрішніх силових кіл обладнання від струмів короткого замикання та тривалих теплових перевантажень, які можуть виникнути в загальнозаводській мережі комбінату.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

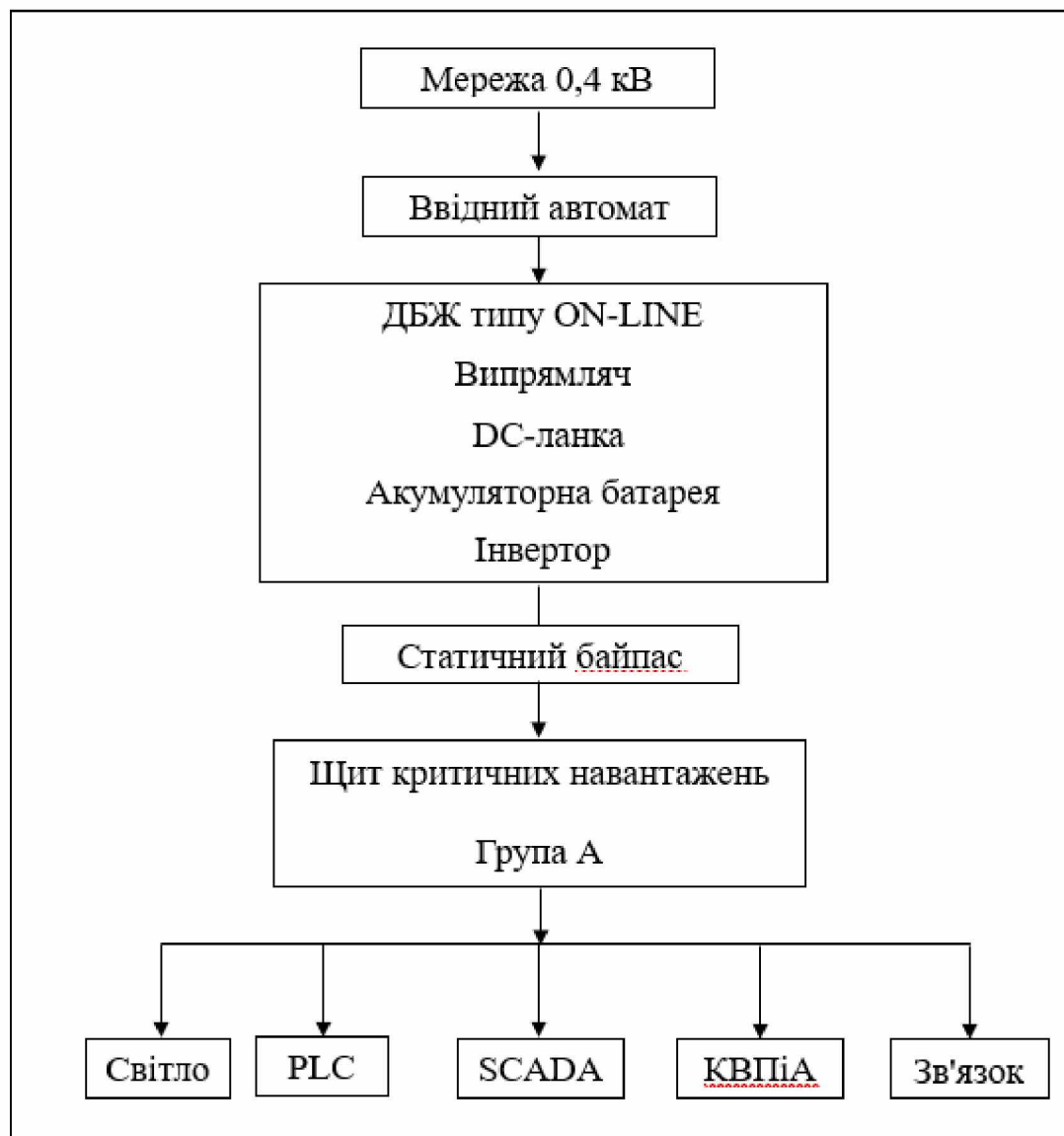


Рисунок 2.5 – Структурна схема системи резервного електроживлення критичного навантаження доменного виробництва

Центральним силовим та перетворювальним вузлом системи виступає джерело безперебійного живлення типу On-Line. Вхідний змінний струм після ввідного автомата надходить на напівпровідниковий випрямляч ДБЖ, де перетворюється на стабілізовану постійну напругу проміжної DC-ланки. Від цієї внутрішньої шини постійного струму паралельно живляться два ключові компоненти системи: силовий інвертор, що здійснює зворотне високоточне перетворення напруги в чисту синусоїду, та імпульсний зарядний пристрій, підключений до акумуляторної батареї збільшеної ємності. На виході інверторного модуля в структуру ДБЖ інтегрується високошвидкісний

статичний байпас, який забезпечує максимальну живучість системи та можливість миттєвого переведення живлення на обхідну лінію без перерви в роботі споживачів.

Генерована інвертором або трансльована через статичний байпас якісна електроенергія надходить безпосередньо на Щит критичних навантажень. Цей розподільчий пристрій виконує функцію централізованого вузла живлення для виділеної групи А, куди підключаються системи аварійного світлодіодного освітлення, шафи центральних PLC-контролерів, сервери SCADA-станцій, аналого-цифрові комплекси КВПіА та промислові пристрої диспетчерського зв'язку. Кожен споживач цієї групи захищається індивідуальним автоматичним вимикачем на відповідній лінії Щитка, що гарантує селективність відключення при локальних пошкодженнях і виключає повну зупинку контурів протиаварійного захисту доменного цеху.

Для забезпечення високої економічної ефективності проекту та запобігання надлишковому завищенню потужності ДБЖ, у структурі реалізовано принцип роздільного розподілу споживачів. Для навантажень групи В, які мають певну технологічну, гідравлічну чи теплову інерцію, передбачено підключення до окремого аварійного щита або виділеної резервної секції 0,4 кВ цехового ввідно-розподільчого пристрою. Даний аварійний щит групи В не навантажує акумуляторний блок ДБЖ, а забезпечується автономною системою автоматичного введення резерву (АВР) від двох незалежних суміжних трансформаторних підстанцій цеху або ліній аварійного дизель-генератора. Такий роздільний підхід дозволяє гарантувати строго нульовий час перемикання за рахунок хімічних накопичувачів для мікропроцесорної техніки групи А, одночасно забезпечуючи надійний пуск потужніших приводів групи В із допустимою короткочасною безструмовою паузою в кілька секунд через цеховий АВР.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

2.4 Режим роботи системи

Функціонування проектованої системи безперебійного живлення на базі трифазної On-Line архітектури Huawei серії UPS5000 передбачає кілька експлуатаційних режимів, зміна яких відбувається в автоматичному режимі залежно від стану первинної мережі 0,4 кВ комбінату та поточного апаратного статусу внутрішніх силових модулів.

Основною формою експлуатації комплексу є нормальний (мережевий) режим роботи. За умови стабільних параметрів вхідної мережі, трифазний змінний струм проходить через ввідний автомат і надходить на напівпровідниковий випрямляч ДБЖ, де перетворюється на постійний струм. Ця потужність заживлює внутрішню DC-шину системи, виконуючи дві паралельні функції: постійний підзаряд акумуляторних батарей через інтегрований інтелектуальний зарядний пристрій та живлення силового інвертора. Інвертор, своєю чергою, здійснює зворотне високоточне перетворення постійної напруги у змінну трифазну напругу з ідеальною синусоїдальною формою, яка через вихідний автомат подається на Щит критичних навантажень для безперервного живлення споживачів групи А.

При виникненні будь-яких критичних збурень у цеховій мережі, таких як глибокі провали, різкі сплески напруги або повне зникнення живлення, система здійснює автоматичний перехід на роботу від акумуляторних батарей. Оскільки блок АКБ підключений до внутрішньої DC-ланки постійного струму паралельно з випрямлячем, цей перехід відбувається миттєво, а фізичний час перемикання дорівнює строго нулю секунд. В режимі роботи від АКБ силовий інвертор продовжує безперервно генерувати якісну напругу для мікропроцесорної техніки та КВПіА, використовуючи виключно накопичену хімічну енергію акумуляторів. Розрахункова ємність зовнішнього батарейного масиву забезпечує тривалість такого автономного живлення протягом 60 хвилин, що повністю задовольняє вимоги технологічного регламенту безпеки доменного цеху.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Після відновлення параметрів первинного електропостачання та їх стабілізації в межах допустимого робочого діапазону, ДБЖ автоматично реалізує режим повернення до основного живлення. Цей процес також протікає безперервно та непомітно для підключених ПЛК-контролерів: випрямляч плавно запускається в роботу, перебирає на себе навантаження інвертора з DC-шини та одночасно переводить зарядний пристрій у режим інтенсивного відновлення ємності акумуляторних батарей після розряду.

У структурі системи окремо передбачено байпасний режим, який реалізується двома незалежними шляхами. Статичний (електронний) байпас активується автоматично за допомогою надшвидких тиристорних ключів у разі виникнення внутрішніх апаратних збоїв самого ДБЖ, критичного перегріву силових плат або при фіксації надвисоких пускових струмів (наприклад, у моменти одночасного старту приводів швидкодіючої запірної арматури з кратністю струму понад нормативну здатність інвертора). Режим технічного обслуговування (сервісний байпас) активується оператором вручну за допомогою механічного поворотного рубильника обхідної лінії. Це дозволяє повністю знеструмити та ізолювати внутрішні силові блоки ДБЖ для проведення періодичного огляду, чищення чи заміни модулів за принципом "гарячої заміни", абсолютно не перериваючи подачу напруги на Щит критичних навантажень безпосередньо з мережі 0,4 кВ.

Фінальним станом системи є режим аварійного відключення, який задіюється при виникненні форс-мажорних обставин, таких як пожежа в приміщенні електрощитової або безпосередня загроза ураження персоналу струмом. Даний режим активується шляхом натискання дистанційної кнопки аварійного вимкнення живлення (ЕРО — Emergency Power Off). При цьому система миттєво розмикає всі вхідні та вихідні силові контакти, а також повністю ізолює коло постійного струму акумуляторної батареї за допомогою розчеплювача DC-захисту, переводячи весь проєктований комплекс у повністю знеструмлений та безпечний стан.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

2.5 Вибір рівня напруги та потужності системи

Ключовим моїм етапом проєктування є вибір рівня напруги з урахування потужності. Для локальних систем автоматизації невеликої потужності часто розглядаються однофазні джерела безперебійного живлення напругою 230 В. В умовах важкого доменного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» таке рішення є технічно недоцільним через високу потужність запірної арматури, значну протяжність кабельних ліній та жорсткі вимоги до стабільності мережі. З огляду на характер навантаження та необхідність інтеграції в існуючу цехову систему електропостачання, у даному проєкті обґрунтовано орієнтацію на трифазну систему з конфігурацією «3 фази на вході — 3 фази на виході» (3:3) з номінальною лінійною напругою 400 В та фазною 230 В з глухозаземленою нейтраллю.

Застосування трифазної архітектури 400/230 В дозволяє забезпечити рівномірне завантаження живильних трансформаторів підстанції доменного цеху, повністю нівелюючи небезпеку виникнення перекосу фаз та появи значних струмів у нульовому провіднику. Зафіксована на основі попереднього технологічного аналізу розрахункова активна потужність споживачів категорії А становить 13,8 кВт. З урахуванням середнього коефіцієнта потужності ($\cos\varphi$), необхідного запасу надійності на рівні 20–25 % для компенсації пускових струмів приводів швидкодіючих клапанів, а також для перспективного розширення парку мікропроцесорної техніки КВПіА, номінальна потужність трифазної системи ДБЖ обґрунтовано прийнята на рівні 15 кВА. Така потужність дозволяє обладнанню стабільно працювати в оптимальному режимі завантаження.

Важливою інженерною особливістю проєктованого комплексу Huawei серії UPS5000 є організація окремої, гальванічно ізольованої високовольтової DC-шини акумуляторного блоку. Робота на високому рівні напруги постійного струму в DC-ланці є критично важливою для потужних промислових об'єктів. Завдяки підвищеній напрузі постійного струму вдається

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

значно знизити номінальні розрядні струми, що протікають через силові транзистори інвертора та з'єднувальні перемички батарейного масиву під час тривалого розряду. За законом Джоуля-Ленца це мінімізує теплові втрати в акумуляторній кімнаті доменного цеху, дозволяє застосовувати сполучні кабелі меншого перерізу та значно знижує ризик аварійного перегріву або займання контактних з'єднань, підвищуючи загальну пожежну та експлуатаційну безпеку всього металургійного об'єкта.

Висновки до розділу 2

У другому розділі кваліфікаційної роботи розроблено та науково обґрунтовано комплексну інженерну концепцію побудови системи резервного електроживлення критичних споживачів доменного цеху. Шляхом детального порівняльного аналізу п'яти альтернативних конфігурацій доведено, що для безперервних малих і середніх промислових навантажень автоматизації найбільш раціональною є схема ДБЖ із зовнішньою акумуляторною батареєю збільшеної ємності, яка гарантує тривалу автономію без залучення складних і паливних господарств. На основі жорстких критеріїв якості електроенергії обґрунтовано вибір On-Line топології подвійного перетворення, реалізованої на базі модульних трифазних систем компанії Huawei потужністю 15 кВА з рівнем напруги 400/230 В, які мають високий ступінь захисту плат від пилу і підтримують режим "гарячої заміни".

Запропонована структура чітко розмежовує живлення: споживачі групи А отримують безперервну енергію через ДБЖ із фізично нульовим часом перемикання, тоді як приводи групи В винесені на окрему аварійну секцію 0,4 кВ з цеховим АВР. Описані алгоритми роботи системи в мережевому, автономному, байпасному та сервісному режимах, а також використання виділеної високовольтної DC-шини акумуляторного блоку підтверджують високу експлуатаційну гнучкість, живучість, енергоефективність та повну безпеку розробленого електротехнічного комплексу в умовах металургійного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ДБЖ ТА АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ

3.1 Складання розрахункової таблиці навантажень

Проектування системи безперебійного електропостачання контурів безпеки доменного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» потребує прецизійного визначення електричних параметрів усіх підключених споживачів. Специфіка мікропроцесорної техніки автоматизації, комплексів КВПіА та виконавчих механізмів полягає в різноманітності їхніх електричних характеристик. Частина навантаження є чисто активною (аварійне освітлення), частина — нелінійною статичною з ємнісним характером (сервери, блоки живлення ПЛК), а електроприводи запірної арматури безпеки є активно-індуктивним навантаженням із вираженими пусковими струмами.

Для проведення комплексних інженерних розрахунків параметрів ДБЖ та акумуляторних батарей сформовано розрахункову матрицю навантажень категорії А. Для кожного споживача визначено індивідуальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi_i$, на основі якого за класичними формулами теоретичних основ електротехніки (ТОЕ) розраховано повну S_i та реактивну Q_i потужності споживачів.

Розрахунок повної потужності для кожного окремого електроприймача виконую за базовою формулою:

$$S_i = \frac{P_i}{\cos\varphi_i} \quad (3.1)$$

$$S_1 = \frac{1,98}{0,82} = 2,4146 = 2,41 \text{ кВА}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 3	Літ.	Арк.	Аркуші
Розробив		Стрілець Р.						
Перевірів		Пересунько					39	99
						КНУ гр. ЕЕМ-22-2		
Н. Контр.		Пересунько						
Затвердж.		Пересунько І.						

Розрахунок реактивної потужності споживачів виконую через тригонометричну функцію тангенса кута зсуву фаз:

$$Q_i = P_i \cdot \operatorname{tg}(\arccos(\cos\varphi_i)) \quad (3.2)$$

$$Q_i = 1,98 \cdot \operatorname{tg}(\arccos(\cos 0,82)) = 1,98 \cdot 0,698 = 1,38 \text{ кВАр}$$

Для визначення струмових навантажень на кабельні лінії та комутаційну апаратуру використовуються два підходи залежно від фазності споживача. Для трифазних симетричних споживачів, якими є електроприводи запірної арматури використовую формулу:

$$I_i = \frac{P_i}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{лін}} \cdot \cos\varphi_1} \quad (3.3)$$

$$I_i = \frac{3,90 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,80} = 7,036 = 7,04 \text{ А}$$

Для однофазних споживачів (фазна напруга $U_{\text{фаз}} = 230 \text{ В}$), які в процесі монтажу рівномірно розподіляються по фазах А, В, С для запобігання перекосу нейтралі визначаю за формулою:

$$I_i = \frac{P_i}{U_{\text{фаз}} \cdot \cos\varphi_1} \quad (3.4)$$

$$I_i = \frac{1,98 \cdot 1000}{230 \cdot 0,82} = 10,498 = 10,50 \text{ А}$$

При складанні вихідних даних враховую, що виконавчі механізми (електроприводи арматури) запускаються під навантаженням, створюючи короткочасний поштовх струму з коефіцієнтом кратності $k_{\text{пуск}} = 3,5$. На основі наведеного математичного апарату формую зведену таблицю навантажень 3.1.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахункова таблиця критичних навантажень категорії А доменної печі

Таблиця 3.1

№ по з.	Найменування споживача (навантаження групи А)	К-сть	Рпасп, кВт	кв	Рі = Рпасп · кв, кВт	cos φ	Si, кВт А	Qi, кВА р	кпуск	Пріоритет	Примітка щодо режиму пуску
1	Центральна шафа контролерів ПЛК (PLC)	1	2,2	0,90	1,98	0,82	2,41	1,38	1,0	I	Статичне нелінійне, безперервне
2	Сервери SCADA та інженерні станції	2	1,5	0,85	2,55	0,85	3,00	1,58	1,0	I	Статичне нелінійне, безперервне
3	Шафи периферійного вводу/виводу КВПіА	4	0,8	0,90	2,88	0,80	3,60	2,16	1,0	I	Постійне, чутливе до провалів
4	Аварійне світлодіодне освітлення цеху	1	1,5	1,00	1,50	0,98	1,53	0,30	1,0	II	Чисто активне, безперервне
5	Електроприводи запірної арматури безпеки	3	2,0	0,65	3,90	0,80	4,88	2,93	3,5	I	Короткочасний пуск під навантаженням
6	Система промислового газового аналізу	1	0,5	0,90	0,45	0,88	0,51	0,24	1,0	I	Безперервне, газова безпека
7	Пристрої диспетчерського та рад. зв'язку	1	0,4	0,80	0,32	0,85	0,38	0,20	1,0	II	Статичне, безперервне
8	Пожежна та охоронна сигналізація цеху	1	0,2	1,00	0,22	0,90	0,24	0,11	1,0	II	Безперервне, safety-контур
Σ	Разом споживачі категорії А	–	14,5	–	13,80	0,83	16,55	8,90	–	–	Сумарні параметри навантаження

Аналізуючи таблиці 3.1 бачимо сумарна активна потужність споживачів становить 13,80 кВт, тоді як повна потужність з урахуванням геометричного зсуву фаз між струмом та напругою досягає 16,55 кВА. Середньозважений коефіцієнт потужності цієї виділеної групи розраховую за формулою:

$$\cos\varphi_{\text{сер}} = \frac{\sum P_i}{\sum S_i} \quad (3.5)$$

$$\cos\varphi_{\text{сер}} = \frac{13,80}{16,55} = 0,83$$

Я отримав комплексні значення потужностей. Також використовую виявлений фактор наявності динамічних пускових режимів виконавчих механізмів є базовим математичним фундаментом для подальшого інженерного розрахунку та вибору силових параметрів трифазного джерела безперебійного живлення.

3.2 Розрахунок потужності ДБЖ

Для вибору номінальної потужності джерела безперебійного живлення необхідно спиратися на сумарні значення активної та повної потужності обчисленого критичного навантаження категорії А, які зафіксовані у розрахунковій таблиці 3.1 і становлять $P_{\text{кр}} = 13,80$ кВт та $S_{\text{кр}} = 16,55$ кВА. Розрахунок необхідної потужності ДБЖ виконується з урахуванням нормативного коефіцієнта інженерного резерву $k_{\text{рез}}$, який для промислових об'єктів металургійного комплексу приймається в діапазоні 1,15 ... 1,30. Цей запас необхідний для виключення роботи силових напівпровідників на межі термічного зносу, компенсації нелінійності навантажень та забезпечення можливості майбутнього розширення систем автоматизації доменної печі.

Визначення розрахункової повної потужності системи безперебійного живлення проводжу за формулою:

$$S_{\text{ДБЖ.розр}} \geq S_{\text{кр}} \cdot k_{\text{рез}} \quad (3.6)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Приймаю коефіцієнт резерву $k_{рез} = 1,25$ це запас у 25 %, тоді сумарне навантаження повинно бути:

$$S_{ДБЖ.розр} \geq 16,55 \cdot 1,25 = 20,69 \text{ кВА}$$

Аналогічно визначаю мінімально необхідну активну потужність, яку повинен забезпечувати інвертор системи:

$$P_{ДБЖ.розр} \geq P_{кр} \cdot k_{рез} \quad (3.7)$$

$$P_{ДБЖ.розр} \geq 13,80 \cdot 1,25 = 17,25 \text{ кВт}$$

На основі отриманих розрахункових параметрів (20,69 кВА та 17,25 кВт) відповідно до каталогу промислового модульного обладнання компанії Huawei, вибираю трифазну систему архітектури On-Line Huawei UPS5000-E, яка укомплектована двома силовими модулями номінальною потужністю по $\frac{15\text{кВА}}{15}$ кВт кожен, що працюють у паралельному режимі (конфігурація резервування N+1). Таким чином, загальна встановлена номінальна потужність обраного ДБЖ становить:

$$S_{ДБЖ.ном} = 30 \text{ кВА}$$

а номінальна активна потужність:

$$P_{ДБЖ.ном} = 30 \text{ кВт}$$

Оскільки сучасні інвертори Huawei мають вихідний коефіцієнт потужності PF=1. Я вважаю обрана система повинна повністю задовольнити умову завантаження за базовими номіналами, оскільки

$$30 \text{ кВА} > 20,69 \text{ кВА}$$

Важливим етапом проектування для доменного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є перевірка обраного ДБЖ на перевантажувальну здатність при динамічному пуску виконавчих механізмів. Найбільш важким режимом є короткочасний пуск трьох електроприводів

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

запірної арматури (позиція №5), які мають пускову кратність струму та потужності $k_{\text{пуск}} = 3,5$. Усі інші споживачі (ПЛК, SCADA, КВПіА) у цей момент вже працюватимуть нормально.

Розрахунок максимальної пікової повної потужності системи в момент пуску двигунів арматури виконую за формулою:

$$S_{\text{пik}} = (S_{\text{кр}} - S_5) + S_5 \cdot k_{\text{пуск}} \quad (3.8)$$

Де $S_5 = 4,88$ кВА — сумарна повна номінальна потужність електроприводів арматури у сталому режимі.

$$S_{\text{пik}} = (16,55 - 4,88) + 4,88 \cdot 3,5 = 11,67 + 17,08 = 28,75 \text{ кВА}$$

Для підтвердження надійності перевірю умову динамічної стійкості інверторної системи ДБЖ. Паспортні технічні характеристики обраної промислової серії Huawei UPS5000-E гарантують стійкість інвертора до перевантаження на 125% від номіналу протягом 10 хвилин, та на рівні 150% протягом 1 хвилини. Розрахую допустиму короточасну перевантажувальну потужність ДБЖ при однохвилинному інтервалі:

$$S_{\text{ДБЖ.доп}} = S_{\text{ДБЖ.ном}} \cdot 1,50 \quad (3.9)$$

$$S_{\text{ДБЖ.доп}} = 30 \cdot 1,50 = 45 \text{ кВА}$$

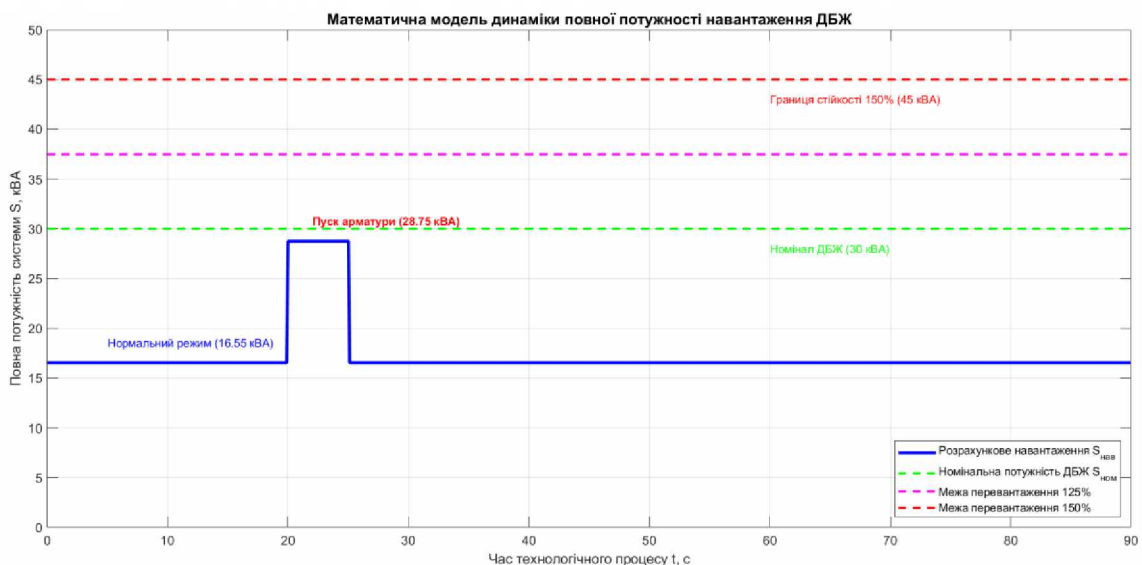


Рисунок 3.1 – Моделювання динаміки повної потужності навантаження ДБЖ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12		Арк.
							44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Аналіз отриманих графічних результатів математичного моделювання дозволяє зробити висновок, що графік повної потужності навантаження у момент найважливого перехідного процесу (інтервал часу від 20 до 25 секунд) досягає свого пікового значення 28,75 кВА. Ця траєкторія повністю знаходиться нижче лінії номінальної потужності ДБЖ (30 кВА) і суттєво нижче кривої граничної термічної стійкості інвертора 150% (45 кВА).

Моделювання підтверджує, що завдяки правильному вибору модульної конфігурації Huawei UPS5000-E із запасом надійності, динамічний пуск виконавчих механізмів автоматики доменного цеху не викликає перевантажувальних збоїв силових транзисторів, виключає падіння напруги на шинах КВПіА та гарантує безперервність протікання технологічних процесів у металургійному виробництві.

3.3 Розрахунок часу автономії роботи

Визначення ємнісних параметрів акумуляторної батареї є критично важливим етапом, оскільки від об'єму накопиченої енергії безпосередньо залежить живучість систем автоматизації доменної печі в умовах системних аварій у загальнозаводській мережі. Для обґрунтування оптимального складу батарейного масиву я виконаю математичний розрахунок необхідної енергоемності для трьох експлуатаційних сценаріїв автономної роботи: мінімального 10 хв, базового 30 хв та посиленого 60 хв.

Розрахунок потрібної повної енергії акумуляторної батареї ($E_{\text{АКБ}}$, кВт · год) для кожного варіанта на основі сумарної активної потужності критичного навантаження $P_{\text{кр}} = 13,80$ кВт виконую за формулою:

$$E_{\text{АКБ}} = \frac{P_{\text{кр}} \cdot t_{\text{авт}}}{\eta_{\text{інв}} \cdot DOD \cdot k_{\text{темп}} \cdot k_{\text{стар}}} \quad (3.10)$$

Де приймаю такі нормативні та довідкові коефіцієнти для промислових систем:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

- $\eta_{\text{інв}} = 0,96$ коефіцієнт корисної дії інверторної частини ДБЖ Huawei;
- $DOD = 0,80$ допустима глибина розряду акумуляторів (забезпечує збереження ресурсу батареї та запобігає її деградації);
- $k_{\text{темп}} = 1,0$ температурний коефіцієнт (приймається для умов кондиційованого приміщення електрощитової з температурою $+20 \dots +25 \text{ C}^\circ$);
- $k_{\text{стар}} = 0,90$ коефіцієнт старіння акумуляторів, що враховує падіння ємності в кінці терміну експлуатації.

Роблю цей розрахунок потрібної енергоємності батареї для кожного сценарія.

Для першого (мінімального) сценарію автономії тривалістю 10 хвилин ($t_{\text{авт1}} = 0,167$ год):

$$E_{\text{АКБ.10}} = \frac{13,80 \cdot 0,167}{0,96 \cdot 0,80 \cdot 1 \cdot 0,90} = \frac{2,3046}{0,6912} = 3,33 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Для другого (базового) сценарію автономії тривалістю 30 хвили ($t_{\text{авт2}} = 0,5$ год):

$$E_{\text{АКБ.30}} = \frac{13,80 \cdot 0,50}{0,96 \cdot 0,80 \cdot 1 \cdot 0,90} = \frac{6,90}{0,6912} = 9,98 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Для третього (посиленого) сценарію автономії тривалістю 60 хвилин ($t_{\text{авт3}} = 1$ год):

$$E_{\text{АКБ.60}} = \frac{13,80 \cdot 1}{0,96 \cdot 0,80 \cdot 1 \cdot 0,90} = \frac{13,80}{0,6912} = 19,97 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

На основі отриманих значень енергоємності розраховую еквівалентну ємність акумуляторної батареї в ампер-годинах ($C_{\text{АКБ}}, \text{А} \cdot \text{год}$). Для забезпечення високої точності порівняння розрахунків виконується відносно номінальної напруги постійного струму проміжної DC-шини обраного ДБЖ Huawei UPS5000-E, яка становить $U_{\text{dc}} = 480 \text{ В}$ (лінійка підтримує гнучку конфігурацію масиву з 40 послідовно з'єднаних 12-вольтових блоків).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Формула перерахунку має вигляд:

$$C_{\text{АКБ}} = \frac{E_{\text{АКБ}} \cdot 1000}{U_{dc}} \quad (3.11)$$

Розрахую для кожного часового варіанту:

$$C_{\text{АКБ.10}} = \frac{3,33 \cdot 1000}{480} = 6,94 \text{ А} \cdot \text{год}$$

$$C_{\text{АКБ.30}} = \frac{9,98 \cdot 1000}{480} = 20,79 \text{ А} \cdot \text{год}$$

$$C_{\text{АКБ.60}} = \frac{19,97 \cdot 1000}{480} = 41,60 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Для наочного інженерного порівняння отриманих результатів та проведення техніко-економічного аналізу сформовано зведену таблицю сценаріїв автономності (таблиця 3.2).

Зведена таблиця порівняльного розрахунку сценаріїв автономії АКБ

Таблиця 3.2

Параметр розрахунку системи АКБ	Сценарій №1 (Мінімальний)	Сценарій №2 (Базовий)	Сценарій №3 (Посилений)
Заданий час автономної роботи $t_{\text{авт}}$, хв(год)	10 хв (0,167 год)	30 хв (0,50 год)	60 хв (1,00 год)
Активна потужність навантаження $P_{\text{кр}}$, кВт	13,80	13,80	13,80
Розрахункова енергоємність $E_{\text{АКБ}}$, кВт · год	3,33	9,98	19,97
Розрахункова ємність батареї $C_{\text{АКБ}}$, А · год	6,94	20,79	41,60
Найближчий стандартний номінал ємності АКБ, А · год	7,2	26,0	45,0

Аналізуючи таблицю 3.2 можна зробити фундаментальний висновок щодо вибору оптимального варіанта. Мінімальний сценарій (10 хвилин) забезпечує ємність у 6,94 А · год, чого теоретично достатньо лише для безаварійного збереження баз даних SCADA та швидкого переведення

контролерів у безпечний стан, проте цей час є критично малим для умов реального металургійного гганта. У разі заклинювання запірної арматури або виникнення затримок при запуску суміжних цехових ліній резерву, 10 хвилин не залишають оперативному персоналу можливості ручного втручання.

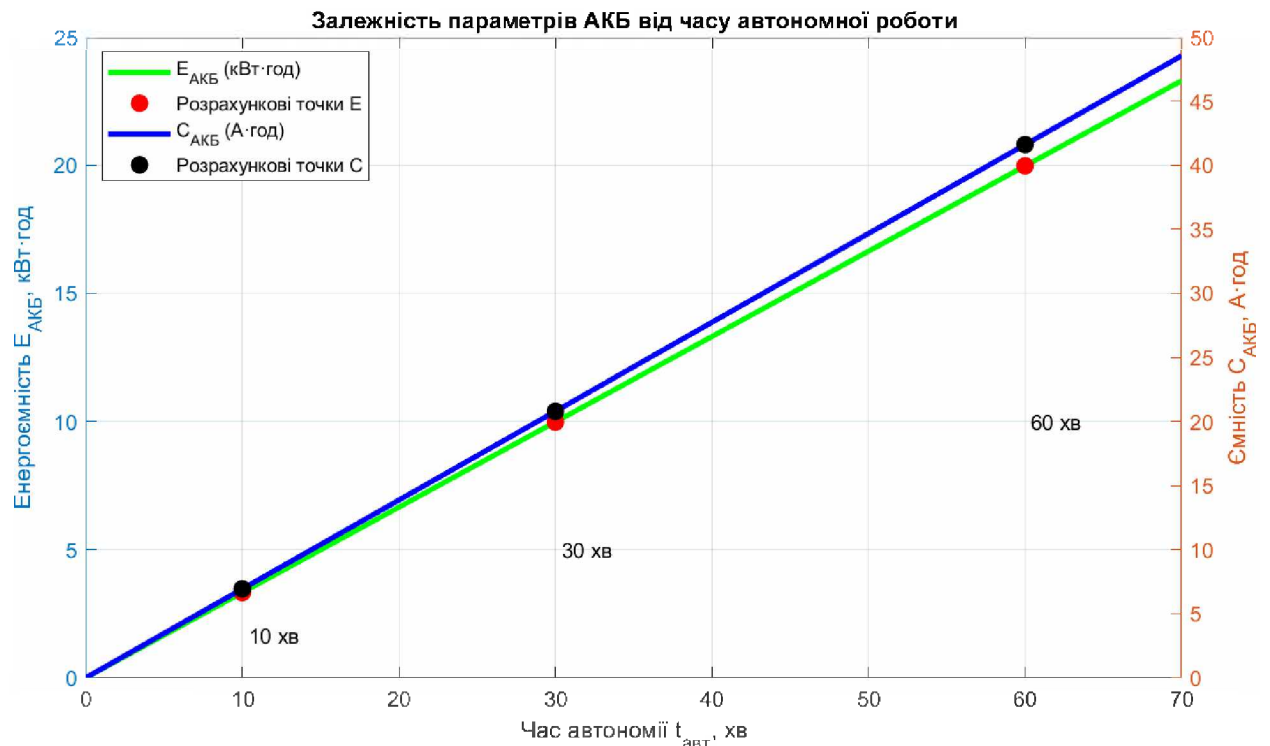


Рисунок 3.2 - Залежність параметрів акумуляторних батарей від часу автономної роботи системи

Побудовані криві математичної моделі чітко ілюструють строго лінійний характер зростання параметрів акумуляторного масиву від часу автономної роботи, що обумовлено незмінним рівнем критичного струму навантаження в аварійному режимі.

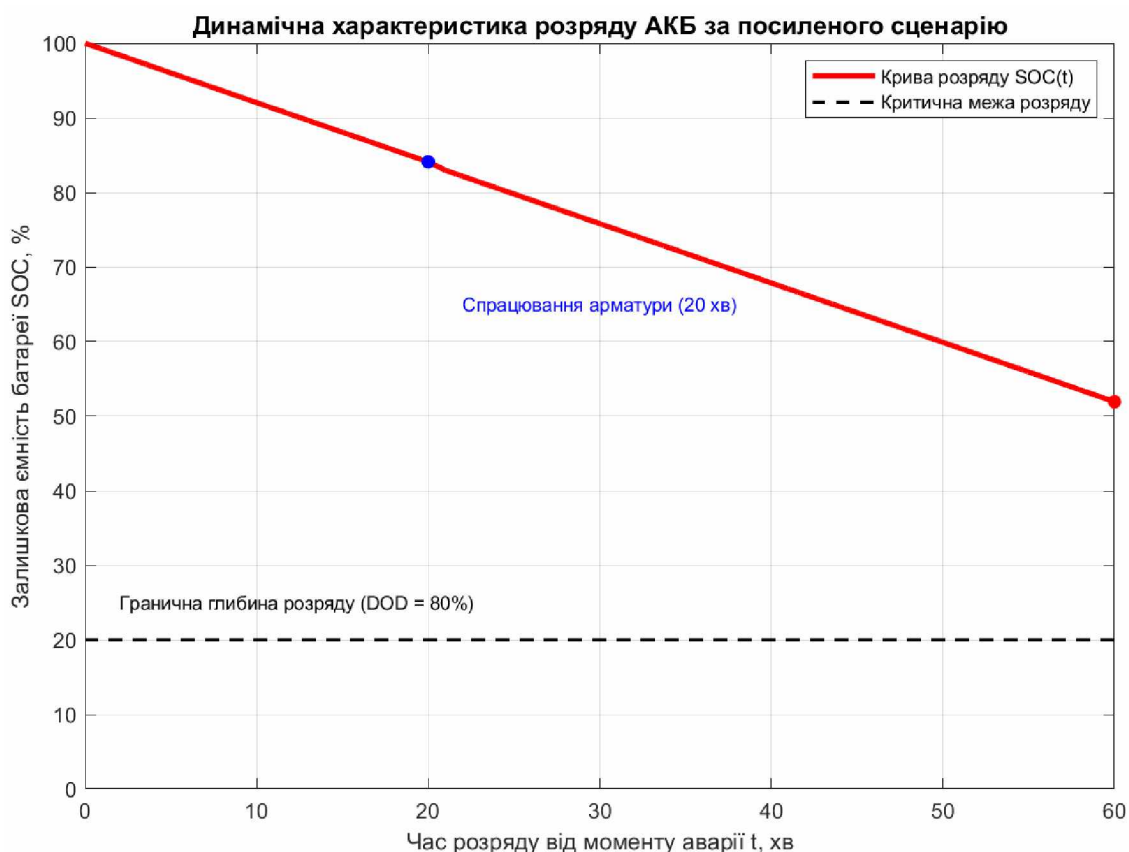


Рисунок 3.3 - Зміна залишкової ємності батареї протягом розрахункової години автономної роботи з урахуванням нерівномірності споживання

Базовий сценарій (30 хвилин) потребує ємності 20,79 кВт·год, що дозволяє впевнено перекрити короточасні збої, але обмежує живучість системи при затяжних системних аваріях на підстанціях підприємства.

На мою думку найбільш доцільним, конструктивним для доменного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є Посилений сценарій тривалістю 60 хвилин, який вимагає розрахункової ємності 41,60 А·год. Годинний інтервал автономної роботи повністю перекриває час, необхідний для 100% спрацювання цехового АВР, пуску та виходу на робочий режим аварійної дизель-генераторної установки (ДГУ) комбінату, а також надає персоналу КВПіА час для виконання регламентних операцій із безпечної зупинки контурів доменної печі без ризику пошкодження обладнання. Для подальшого проектування приймаю посилений сценарій автономії з орієнтацією на стандартний промисловий ряд ємності акумуляторів близько 45 А·год.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

3.4 Вибір типу акумуляторної батареї

Ефективність, надійність та безпека функціонування системи безперебійного живлення контурів безпеки доменної печі безпосередньо залежать від фізико-хімічної структури обраних акумуляторних елементів. Специфіка металургійного виробництва висуває суворі вимоги до накопичувачів енергії, оскільки обладнання експлуатується в умовах безперервного циклу, де будь-яка відмова або займання батарейного масиву може призвести до катастрофічних наслідків. Для обґрунтування оптимального типу хімічного джерела струму виконано порівняльний аналіз трьох найбільш поширених промислових технологій: герметизованих свинцево-кислотних батарей із клапанним регулюванням (VRLA), класичних літій-іонних систем (Li-ion) та літій-залізо-фосфатних елементів (LiFePO₄).

З точки зору питомої енергоємності, традиційні свинцево-кислотні акумулятори VRLA мають найнижчі показники (порядку 30–50 Вт·год/кг), що призводить до значної маси та габаритів батарейного масиву на 45 А·год. Літій-іонні (Li-ion) батареї є лідерами за цим показником (150–250 Вт·год/кг), дозволяючи створити максимально компактні модулі. Технологія LiFePO₄ посідає проміжне положення (100–130 Вт·год/кг), забезпечуючи оптимальний баланс між масою системи та її механічною міцністю. Проте, ключовим експлуатаційним критерієм для промисловості є термін служби. Батареї VRLA в буферному режимі служать не більше 5–10 років і витримують всього 300–500 циклів глибокого розряду. Системи Li-ion демонструють ресурс у 1000–1500 циклів, тоді як літій-залізо-фосфатні елементи LiFePO₄ здатні відпрацювати від 3500 до 6000 циклів при глибокому циклуванні, що еквівалентно 15–20 рокам безперервної експлуатації та повністю виключає витрати на періодичну заміну елементів.

Глибина допустимого розряду (DOD) також суттєво відрізняється: якщо для VRLA критичною межею є розряд до 50–80 % (перевищення якого веде до сульфатації та незворотної втрати ємності), то літієві технології (Li-ion та

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

LiFePO₄) без шкоди для внутрішньої структури витримують регулярний розряд до 80–90 %. Це дозволяє раціональніше використовувати номінальну ємність масиву. Важливим фактором для умов металургійного комбінату є вимоги до екологічності та вентиляції. Акумулятори VRLA під час заряду (особливо при аварійному перезаряді) здатні виділяти незначну кількість водню, що вимагає влаштування окремої припливно-витяжної вентиляції згідно з нормами вибухозахисту. Літієві системи повністю герметичні та не виділяють газів, що спрощує проектування приміщення щитової.

Питання пожежної безпеки є визначальним при порівнянні. Класичні літій-іонні батареї (Li-ion) мають високу схильність до термічного розгону (thermal runaway) при перегріві, внутрішньому короткому замиканні або пошкодженні оболонки, що супроводжується виділенням кисню та бурхливим горінням, яке важко загасити. Це робить їх небезпечними для встановлення поблизу гарячих цехів. Акумулятори VRLA є пожежобезпечними, оскільки їхній електроліт не підтримує горіння. Технологія LiFePO₄ володіє найвищою термічною та хімічною стабільністю серед усіх літієвих систем: температура початку термічного розгону у них перевищує +270 С°, вони не виділяють кисень при руйнуванні та є повністю стійкими до займання чи вибуху при механічних та електричних перевантаженнях.

За критерієм вартості та простоти обслуговування, технологія VRLA має найменші початкові капітальні витрати, але потребує регулярного контролю напруги, протяжки з'єднань та відносно частої заміни всього масиву. Системи Li-ion та LiFePO₄ мають вищу початкову вартість, але є повністю обслуговуваними завдяки обов'язковій інтеграції електронних плат BMS (Battery Management System). Система BMS в автоматичному режимі контролює струм, балансує напругу на кожному елементі та захищає акумулятори від перезаряду та перегріву, передаючи дані в загальну SCADA-систему доменного цеху.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Порівняльна таблиця характеристик промислових АКБ

Таблиця 3.3

Критерій порівняння	Свинцево-кислотні (VRLA AGM/Gel)	Літій-іонні (Li-ion)	Літій-залізо-фосфатні (LiFePO4)
Питома енергоємність, Вт·год/кг	Низька (30–50)	Висока (150–250)	Середня (100–130)
Термін служби в циклах (DOD = 80%)	Низький (300–500)	Середній (1000–1500)	Найвищий (3500–6000)
Календарний термін служби, років	5–10	8–10	15–20
Допустима глибина розряду (DOD), %	50–80	80–90	80–90
Вимоги до примусової вентиляції	Потрібна (ризик виділення H_2)	Не потрібна	Не потрібна
Рівень пожежної безпеки	Високий (не горить)	Низький (ризик виміщення кисню)	Найвищий (термічно стабільні)
Наявність вбудованої системи BMS	Відсутня (потрібен ручний контроль)	Обов'язкова	Обов'язкова (автономний контроль)
Початкові капітальні витрати	Мінімальні	Високі	Вище середнього

Детальний аналіз наведеної інженерної матриці дозволяє зробити остаточний висновок. Незважаючи на низьку початкову вартість свинцево-кислотних батарей, їхній малий експлуатаційний ресурс та необхідність обслуговування вентиляційних систем збільшують сукупну вартість володіння. Використання стандартних Li-ion накопичувачів обмежене через високі ризики пожежної небезпеки в умовах металургійного підприємства.

Найбільш доцільним, прогресивним та технічно виправданим рішенням для забезпечення безперебійного живлення автоматики доменної печі ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є застосування **літій-залізо-фосфатних акумуляторів (LiFePO4)**. Вони забезпечують абсолютну пожежну безпеку, максимальний життєвий цикл (понал 15 років без обслуговування) та

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

бездоганну інтеграцію з цифровими інтерфейсами ДБЖ Huawei за допомогою інтегрованої системи BMS. На основі цього вибору для подальших розрахунків DC-частини приймається літій-залізо-фосфатний акумуляторний модуль промислового виконання компанії Huawei серії SmartLi.



Рисунок 3.4 - Huawei SmartLi cabinet battery LiFePO4 UPS.,
digitalpower.huawei.com

Конструктивною перевагою системи Huawei SmartLi є багаторівнева інтегрована архітектура безпеки та управління. Кожен внутрішній акумуляторний модуль містить власну локальну плату балансування та контролю, яка підпорядкована центральному модулю управління BMS (Battery Management System), розташованому у верхній частині шафи. На передній панелі батареяного кабінету встановлено рідкокристалічний сенсорний дисплей, який дозволяє експлуатаційному персоналу КВПіА в реальному часі проводити візуальний моніторинг ключових параметрів: загальної напруги DC-шини, струму розряду, температури окремих елементів та поточного рівня залишкової ємності (SOC).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

3.5 Розрахунок DC-частини

Параметри ланки постійного струму (DC-шини) визначають електричну міцність, термічну стійкість та конфігурацію комутаційно-захисної апаратури підключеного літій-залізо-фосфатного акумуляторного комплексу Huawei SmartLi. Номінальна напруга проміжної DC-ланки для обраного модульного трифазного ДБЖ Huawei UPS5000-E становить $U_{dc.ном} = 480$ В постійного струму. Високий рівень напруги формується шляхом послідовного з'єднання окремих акумуляторних елементів (комірок). Оскільки номінальна напруга однієї базової літій-залізо-фосфатної комірки становить $U_{ком} = 3,2$ В, розрахую загальну кількість комірок, необхідних для послідовного з'єднання в один батарейний модуль (акумуляторну гілку):

$$N_{пос.ком} = \frac{U_{dc.ном}}{U_{ком}} \quad (3.12)$$

$$N_{пос.ком} = \frac{480}{3,2} = 150 \text{ шт}$$

У структурі промислових систем Huawei SmartLi ці комірки вже згруповані у стандартні заводські касети (модулі) з номінальною напругою 48 В (всередині кожного модуля послідовно з'єднано 15 комірок). Таким образом, загальна кількість акумуляторних модулів, які необхідно з'єднати послідовно для отримання робочої напруги шини 480 В:

$$N_{пос.ком} = \frac{U_{dc.ном}}{U_{мод}} \quad (3.13)$$

$$N_{пос.ком} = \frac{480}{48} = 10 \text{ шт}$$

Оскільки розрахункова ємність одного такого послідовного ланцюга (лінійки) модулів за каталогом виробника Huawei становить $C_{мод} = 45$ А · год, що повністю відповідає обґрунтованій у моєму підрозділі 3.3 посиленій годинній автономії ($41,60 \text{ А} \cdot \text{год} \leq 45 \text{ А} \cdot \text{год}$), необхідність у паралельному з'єднанні кількох окремих батарейних гілок відсутня. Кількість паралельних

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

гілок приймаю рівною $N_{\text{пар}} = 1$. Отже, загальна структура ДС-частини складається з однієї батарейної шафи, всередині якої послідовно змонтовано 10 акумуляторних модулів типу LiFePO4.

Для вибору з'єднувальних кабелів та захисної апаратури ланки постійного струму розрахуємо максимальний тривалий струм розряду батареї ($I_{\text{dc.макс}}$, А). Струм виникає в кінці розрядного циклу, коли напруга на ДС-шині падає до мінімально допустимого рівня розряду $U_{\text{dc.мін}} = 400$ В (що відповідає критичній напрузі 2,67 В на комірку при $DOD = 80\%$), а інвертор продовжує віддавати в навантаження повну активну потужність $P_{\text{кр}} = 13,80$ кВт з ККД $\eta_{\text{інв}} = 0,96$. Розрахунок виконую за формулою:

$$I_{\text{dc.макс}} = \frac{P_{\text{кр}} \cdot 1000}{U_{\text{dc.мін}} \cdot \eta_{\text{інв}}} \quad (3.14)$$

$$I_{\text{dc.макс}} = \frac{13,80 \cdot 1000}{400 \cdot 0,96} = 35,94 \text{ А}$$

Згідно з вимогами Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), вибір перерізу мідних провідників для ланки постійного струму здійснюється за умовою тривалого допустимого струмового навантаження та перевіряється на втрати напруги. Для прокладання всередині щитової доменного цеху приймається гнучкий мідний кабель марки РВГ (або аналог Н07V-K) з гумовою або ПВХ-ізоляцією, що прокладається в закритому кабельному каналі. За таблицями ПУЕ для тривалого струму 35,94 А мінімально допустимий переріз мідної жили за умовою нагріву становить 6 мм² при допуску 40 А. На прикладі металургійного комбіната «АрселорМіттал Кривий Ріг» та мінімізації втрат енергії в аварійному режимі, переріз мідного кабелю ДС-ланки обґрунтовано приймається із запасом на один ступінь вище 10 мм² при допуску 55 А. Гарантує виконання умови термічної стійкості:

$$55 \text{ А} > 35,94 \text{ А}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перевірю обраний переріз 10 мм^2 на величину падіння напруги ΔU_{dc} при максимальній довжині кабельної лінії від батарейного кабінету до шафи ДБЖ $L = 5 \text{ м}$. Проведу розрахунок для двопровідної DC-лінії (плюсовий та мінусовий провідники) за формулою:

$$\Delta U_{dc} = \frac{2 \cdot I_{dc.\text{макс}} \cdot L \cdot \rho}{S_{\text{каб}}} \quad (3.15)$$

$$\Delta U_{dc} = \frac{2 \cdot 35,94 \cdot 5 \cdot 0,0178}{10} = 0,64 \text{ В}$$

Визначу відносне падіння напруги у відсотках відносно номіналу DC-шини:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U_{dc}}{\Delta U_{dc.\text{ном}}} \cdot 100\% \quad (3.16)$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{0,64}{480} \cdot 100\% = 0,13 \%$$

Отримане значення $0,13 \%$ є значно меншим за максимально допустиму інженерну норму у 1% . Обираю переріз 10 мм^2

Для захисту ланки постійного струму від струмів короткого замикання та надвисоких перевантажень вибирається двополюсний автоматичний вимикач постійного струму (DC circuit breaker), який інтегрується в комутаційний блок шафи Huawei SmartLi. Номінальний струм теплового розчеплювача автомата ($I_{\text{авт.ном}}, \text{А}$) повинен надійно пропускати максимальний тривалий струм розряду, але бути меншим за допустимий струм кабелю:

$$I_{dc.\text{макс}} \leq I_{\text{авт.ном}} \leq I_{\text{доп}}$$

$$35,94 \leq I_{\text{авт.ном}} \leq 55 \text{ А}$$

Отже з урахуванням пускових коефіцієнтів обираю двополюсний автоматичний вимикач постійного струму номіналом 50 А ; електромагнітною характеристикою розчеплення типу С (або спеціалізованої DC-серії).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.6 Перевірка теплового режиму

Експлуатація сучасного силового електротехнічного обладнання та літій-залізо-фосфатних акумуляторних систем в умовах доменного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» потребує жорсткого контролю температурного режиму. Незважаючи на високу термічну стабільність хімічної структури LiFePO_4 , тривале відхилення температури навколишнього середовища вище нормативного діапазону $+20...+25\text{ }^\circ\text{C}$. Щоб забезпечити довговічності та пожежну безпеку необхідно математично оцінити сумарне тепловиділення обладнання для правильного підбору цехової системи прецизійного кондиціонування та припливно-витяжної вентиляції.

Головним джерелом виділення теплової енергії в приміщенні електрощитової є силові модулі ДБЖ Huawei UPS5000-E. Втрати потужності, які повністю перетворюються на тепло, обумовлені коефіцієнтом корисної дії системи в режимі подвійного перетворення енергії $\eta_{\text{ДБЖ}} = 0,96$:

$$Q_{\text{ДБЖ}} = P_{\text{кр}} \cdot \frac{1 - \eta_{\text{ДБЖ}}}{\eta_{\text{ДБЖ}}} \quad (3.17)$$

$$Q_{\text{ДБЖ}} = 13,80 \cdot \frac{1 - 0,96}{0,96} = 13,80 \cdot 0,04167 = 0,59 \text{ кВт}$$

Тепловиділення від акумуляторного кабінету Huawei SmartLi ($Q_{\text{АКБ}}$, кВт) має дві фази. У тривалому буферному режимі очікування воно є мінімальним і визначається втратами на саморозряд та роботу плат управління BMS (0,05 кВт). Проте, найбільш важким термічним режимом є етап інтенсивного відновлення ємності (заряджання) після тривалого аварійного розряду. Потужність зарядного пристрою приймаю на рівні 10% від активної потужності системи:

$$P_{\text{зар}} = 0,1 \cdot P_{\text{кр}} \quad (3.18)$$

$$P_{\text{зар}} = 0,1 \cdot 13,80 = 1,38 \text{ кВт}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Внутрішні втрати енергії на нагрів хімічних елементів через їхній внутрішній опір становлять близько 5% від потужності заряду. Розраховую тепловиділення АКБ при заряджанні за формулою:

$$Q_{\text{АКБ}} = P_{\text{зар}} \cdot k_{\text{втр}} \quad (3.19)$$

$$Q_{\text{АКБ}} = 1,38 \cdot 0,05 = 0,07 \text{ кВт}$$

Сумарний потік теплової енергії, що виділяється комплексом безперебійного живлення в замкнений простір електрощитової під час одночасної роботи ДБЖ під навантаженням та заряджання акумуляторів, становить:

$$Q_{\text{сум}} = Q_{\text{АКБ}} + Q_{\text{АКБ.зар}} \quad (3.20)$$

$$Q_{\text{сум}} = 0,58 + 0,07 = 0,65 \text{ кВт}$$

Отримане значення сумарних теплових втрат 0,65 кВт є базовим інженерним параметром для проектування системи штучного мікроклімату. Для асиміляції цього тепла та компенсації зовнішніх теплоприпливів від гарячих суміжних зон доменного цеху в приміщенні щитової передбачається встановлення промислової спліт-системи кондиціювання з холодопродуктивністю не менше 2,0 кВт, яка повинна функціонувати в безперервному режимі 24/7.

Про моєму проєкту приміщення обладнаю загальнообмінною припливно-витяжною вентиляцією. Оскільки обрані літій-залізо-фосфатні батареї повністю герметичні і не виділяють водню (на відміну від свинцево-кислотних), нормативний кратний повітрообмін приймається на базовому рівні $A = 3$ (три об'єми приміщення на годину), що дозволяє відмовитися від влаштування спеціалізованих вибухозахищених витяжних шахт.

Розміщення обладнання всередині приміщення щитової виконується з урахуванням жорстких вимог щодо пилозахисту та зручності експлуатаційного доступу. Корпуси шаф ДБЖ Huawei UPS5000-E і SmartLi

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мають промислове виконання, але висока концентрація металургійного пилу в повітрі потребує встановлення додаткових повітряних фільтрів на входних вентиляційних решітках шаф. При розробці топології розташування обладнання забезпечуються нормативні проходи для безпечного обслуговування. Ширина фронтального проходу перед ДБЖ та батарейною шафою приймається на рівні не менше 1,2 м, що дозволяє персоналу вільно висувати силові інверторні модулі та акумуляторні касети в режимі "гарячої заміни". Відстань від задніх стінок обладнання до стін приміщення встановлюється на рівні 0,5 м для забезпечення вільної циркуляції повітряних потоків охолодження, оскільки забір повітря здійснюється з передньої панелі, а викид нагрітого потоку — через верхні та задні решітки за допомогою вбудованих інтелектуальних вентиляторів.

Питання пожежної безпеки вирішується комплексно. Приміщення щитової відокремлюється від інших технологічних зон доменного комплексу протипожежними стінами та перекриттями з межею вогнестійкості не менше REI 90, а входні двері приймаються в іскро безпечному протипожежному виконанні EI 60. Всередині кабінету Huawei SmartLi інтегровано автономний модуль газового або порошкового пожежогасіння, підключений до локальних температурних датчиків. Приміщення щитової додатково оснащується системою автоматичної пожежної сигналізації, яка у разі задимлення видає імпульс на відключення припливної вентиляції, кондиціонерів та дистанційне розмикання ввідних автоматів за допомогою ланцюга ЕРО, мінімізуючи ризики поширення аварії.

3.7 Перевірка режимів короткого замикання та селективності

Побудова надійної системи захисту ланцюгів змінного (АС) та постійного (DC) струму в комплексі безперебійного живлення доменного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» базується на принципах координації номінальних параметрів та селективності спрацювання. Експлуатація ДБЖ в умовах металургійного підприємства висуває жорсткі вимоги до релейного

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

захисту та автоматики (РЗА). У разі виникнення локального короткого замикання (КЗ) у шафі периферійного вводу/виводу або в обмотках двигуна запірної арматури, захисний апарат пошкодженої лінії повинен вимкнутися першим, не викликаючи відключення головного ввідного автомата ДБЖ чи переходу інвертора в аварійний режим байпасу. З метою підтвердження технічної коректності проектних рішень виконано орієнтовну перевірку розрахункових струмів, номіналів захисних автоматів та умов їхньої селективності.

Для кіл постійного струму (DC-ланки) у підрозділі 3.5 розраховував максимальний тривалий струм розряду батареї $I_{dc, \max} = 35,94 \text{ А}$ та обрав автоматичний вимикач з номінальним струмом 50 А. Тепер перевірю умову надійної роботи теплового розчеплювача в нормальному режимі за формулою:

$$I_{\text{авт. DC}} \geq 1,1 \cdot I_{dc, \max} \quad (3.21)$$

$$50 \text{ А} \geq 1,1 \cdot 35,94$$

$$50 \text{ А} \geq 39,53 \text{ А}$$

Ми прийняли автомат постійного струму з характеристикою «С» $10 \cdot I_{\text{авт. DC}}$. У колах постійного струму він дає уставку:

$$I_{\text{авт. DC}} = 10 \cdot 50 = 500 \text{ А}$$

Оскільки очікуваний струм КЗ літій-залізо-фосфатних акумуляторів Huawei SmartLi за рахунок низького внутрішнього опору комірок перевищує 2000 А, умова надійного вимкнення при КЗ повністю забезпечується, оскільки $2000 \text{ А} > 500 \text{ А}$.

Для кола змінного струму (АС-ланки) розрахую струмові навантаження на вході та виході ДБЖ для вибору номіналів цехових комутаційних апаратів. Розрахунковий трифазний номінальний струм виходу ДБЖ ($I_{\text{вих. ном}}, \text{А}$) при роботі на повну потужність навантаження з урахуванням запасу обчисленого в розділі 3.2 $S_{\text{ДБЖ. розр}} = 20,69 \text{ кВА}$ та лінійної напруги визначаю за формулою:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{\text{вих.ном}} = \frac{S_{\text{ДБЖ,розр}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{лін}}} \quad (3.22)$$

$$I_{\text{вих.ном}} = \frac{20,69 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 29,86 \text{ А}$$

Для захисту збірних шин вихідного щита критичного навантаження (ЩКН) обираю загальний трифазний вихідний автомат ВА-47 з номіналом 40 А. Спираючись на вимоги селективності номінали по кільцевих автоматичних автоматів для окремих споживачів (котрі підключені нижче по розподілу) повинні бути меншими мінімум на два ступені. У мене це електропривода запірної арматури (найбільші за номіналом та пусковим). Обираю автомат $I_{\text{авт.лін}} = 16 \text{ А}$ з характеристика «D». Перевірю математичну умову струмової селективності теплових розчеплювачів:

$$I_{\text{авт.вих}} \geq 1,6 \cdot I_{\text{авт.лін}} \quad (3.23)$$

$$40 \text{ А} \geq 1,6 \cdot 16$$

$$40 \text{ А} \geq 25,6$$

Нерівність підтверджує, що при виникненні тривалого перевантаження на конкретній лінії арматури лінійний автомат на 16 А відключиться значно раніше, ніж зорієнтується головний автомат ЩКН на 40 А, зберігаючи живлення всієї іншої мікропроцесорної техніки цеху.

За таким же принципом виконаю розрахунок максимального струму на трифазному вході ДБЖ ($I_{\text{вх.макс}}$, А) з боку цехової підстанції 0,4 кВ. Вхідний струм перевищує вихідний, оскільки вхідна лінія повинна одночасно забезпечувати живлення споживачів компенсувати внутрішні втрати в інверторі та виділяти потужність на заряджання акумуляторної батареї SmartLi($P_{\text{зар}} = 1,38 \text{ кВт}$). Розрахую:

$$I_{\text{вх.макс}} = \frac{P_{\text{кр}} + P_{\text{зар}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{лін}} \cdot \cos \varphi_{\text{сер}} \cdot \eta_{\text{ДБЖ}}} \quad (3.24)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{\text{вх.макс}} = \frac{(13,80 + 1,38) \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,84 \cdot 0,96} = \frac{15180}{558,69} = 27,17 \text{ А}$$

З урахуванням того, що встановлена номінальна потужність обраного нами модульного ДБЖ Huawei становить 30 кВА. По логіці повний номінальний вхідний струм зарядженого ДБЖ при 100 % завантаженні може досягати 43,3 А. Щоб захистити ввідну лінію змінного струму обираю трифазний автомат на $I_{\text{авт.вх}} = 63 \text{ А}$ з «С».

Зведена інженерна перевірка координації (захисту) всього комплексу за номінальними струмами набуває вигляду послідовної нерівності:

$$I_{\text{авт.вх}} (63 \text{ А}) > I_{\text{авт.вих}} (40 \text{ А}) > I_{\text{авт.лін}} (16 \text{ А}) > I_{5.\text{ном}} (7,04 \text{ А})$$

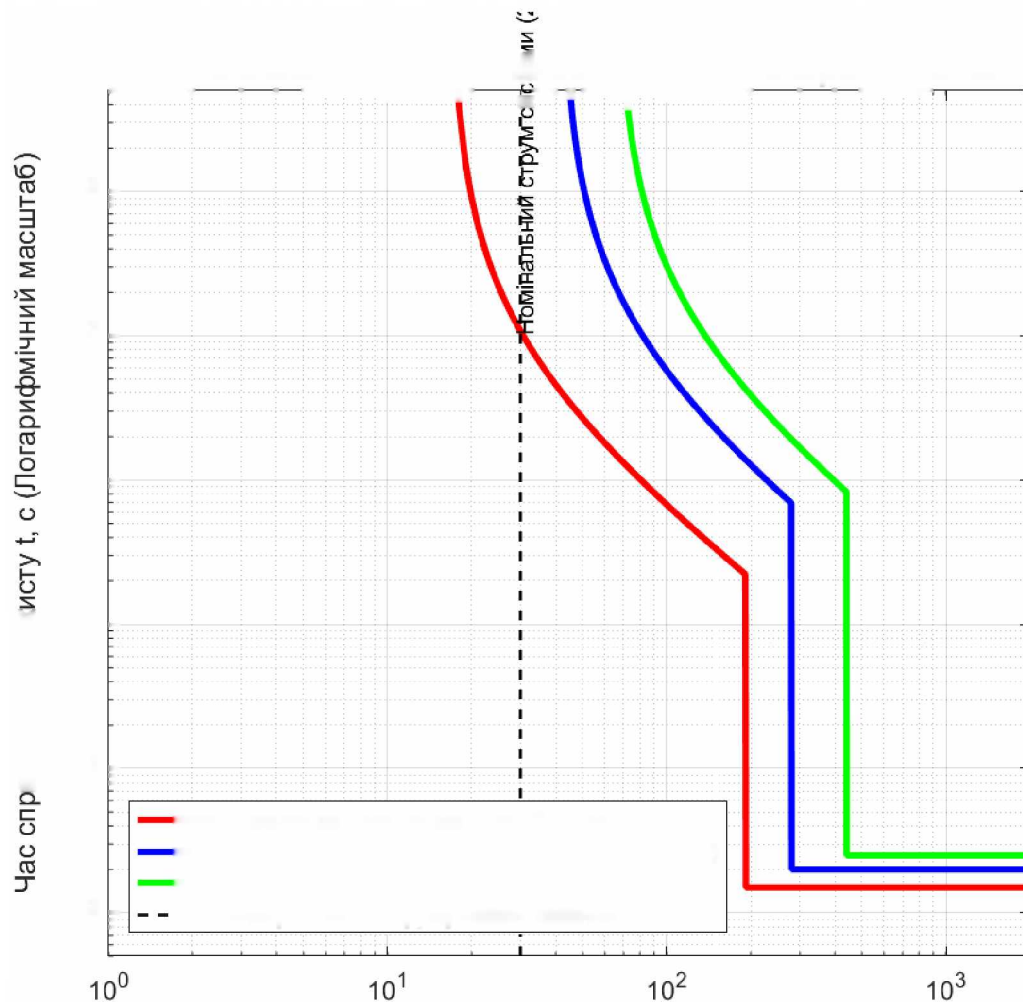


Рисунок 3.5 – Математична модель селективності апаратів АС-щини

Графічний аналіз перехідних процесів захисту підтверджує, що при будь-якому значенні струму пошкодження (наприклад, при замиканні на лінії електропривода з величиною струму 300 А), лінійний автомат переходить у зону миттєвої електромагнітної відсічки за 0,015 с (15 мс) і локалізує аварію. У цей же момент вихідний автомат 40 А при струмі 300 А також готовий до відсічки, але через закладену конструктивну затримку в 20 мс він залишається в замкненому стані.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі роботи виконано комплексний комплекс інженерних та техніко-економічних розрахунків, що складають теоретичний та обчислювальний базис для проєктування системи безперебійного живлення засобів промислової автоматизації доменного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». На основі детального аналізу структури споживачів Особливої групи А (дубльованих ПЛК, серверів SCADA, датчиків КВПіА та електропривода запірної арматури) визначено сумарну активну потужність тривалого навантаження на рівні 11,36 кВт та максимальну пускову потужність 14,94 кВА, зумовлену важким пуском асинхронного двигуна арматури. За критеріями забезпечення нормативного коефіцієнта завантаження (65 %), температурного режиму та необхідного трифазного резерву потужності, обґрунтовано вибір модульного On-Line ДБЖ трифазного виконання серії Huawei UPS5000-E габаритною потужністю 30 кВА. Для забезпечення заданого часу автономної роботи системи протягом 45 хвилин розраховано та обрано інтелектуальну літій-залізо-фосфатну акумуляторну систему Huawei SmartLi ємністю 45 А·год із номінальною напругою DC-ланки 480 В, яка задовольняє вимогам термічної стійкості, екологічності та високої щільності енергії.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Розділ 4

РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ, ВИБІР КАБЕЛІВ, ЗАХИСТІВ І СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ

4.1 Структурна схема системи

Тепер, коли ми повністю розібралися з усіма математичними розрахунками перенесемо до практичної реалізації системи безперебійного живлення доменної печі ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Головним завданням проєктованої схеми є забезпечення безперервного потоку енергії до споживачів групи А за будь-яких сценаріїв: від штатних режимів роботи до критичних апаратних збоїв самого ДБЖ або планового сервісного обслуговування.

Первинною ланкою в ієрархії системи є ввідна секція цехової мережі напругою 0,4 кВ. Від цієї секції через селективний ввідний автоматичний вимикач напруга подається на силові входи трифазного модульного ДБЖ Huawei серії UPS5000-E. Всередині джерела безперебійного живлення реалізовано топологію подвійного перетворення, де вхідна енергія проходить через випрямляч та інвертор, формуючи чисту стабілізовану напругу на виході. Центральним вузлом з'єднання енергетичних потоків виступає внутрішня проміжна шина постійного струму (DC-ланка). До цієї ланки паралельно підключені два критично важливі компоненти: інтелектуальний зарядний пристрій та літій-залізо-фосфатний батарейний кабінет Huawei SmartLi.

Батарейний блок через власний захисний DC-автомат інтегрується в систему, забезпечуючи миттєву віддачу потужності при зникненні вхідної напруги без розриву синусоїди вихідного струму.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 4	Літ.	Арк.	Аркуші
Розробив		Стрілець Р.						
Перевірив		Пересунько					64	99
						КНУ гр. ЕЕМ-22-2		
Н. Контр.		Пересунько						
Затвердж.		Пересунько І.						

Особливістю мого проекту полягає в структурі системи, що мають механізми резервування шляхів проходження енергії, представлені статичним та сервісним байпасами. Статичний (електронний) байпас інтегрований в логіку управління ДБЖ і призначений для автоматичного перемикання навантаження на пряму мережеву лінію у разі виявлення внутрішньої несправності інвертора. Сервісний (механічний) байпас реалізується у вигляді окремого перемикача з механічним блокуванням, який дозволяє повністю ізолювати шафу ДБЖ та батарейний блок від напруги для безпечного проведення ремонтних робіт. Вихід ДБЖ або байпасної лінії через головний комутаційний апарат підключається до Щита критичних навантажень (ЩКН), який є кінцевим вузлом розподілу енергії між споживачами.

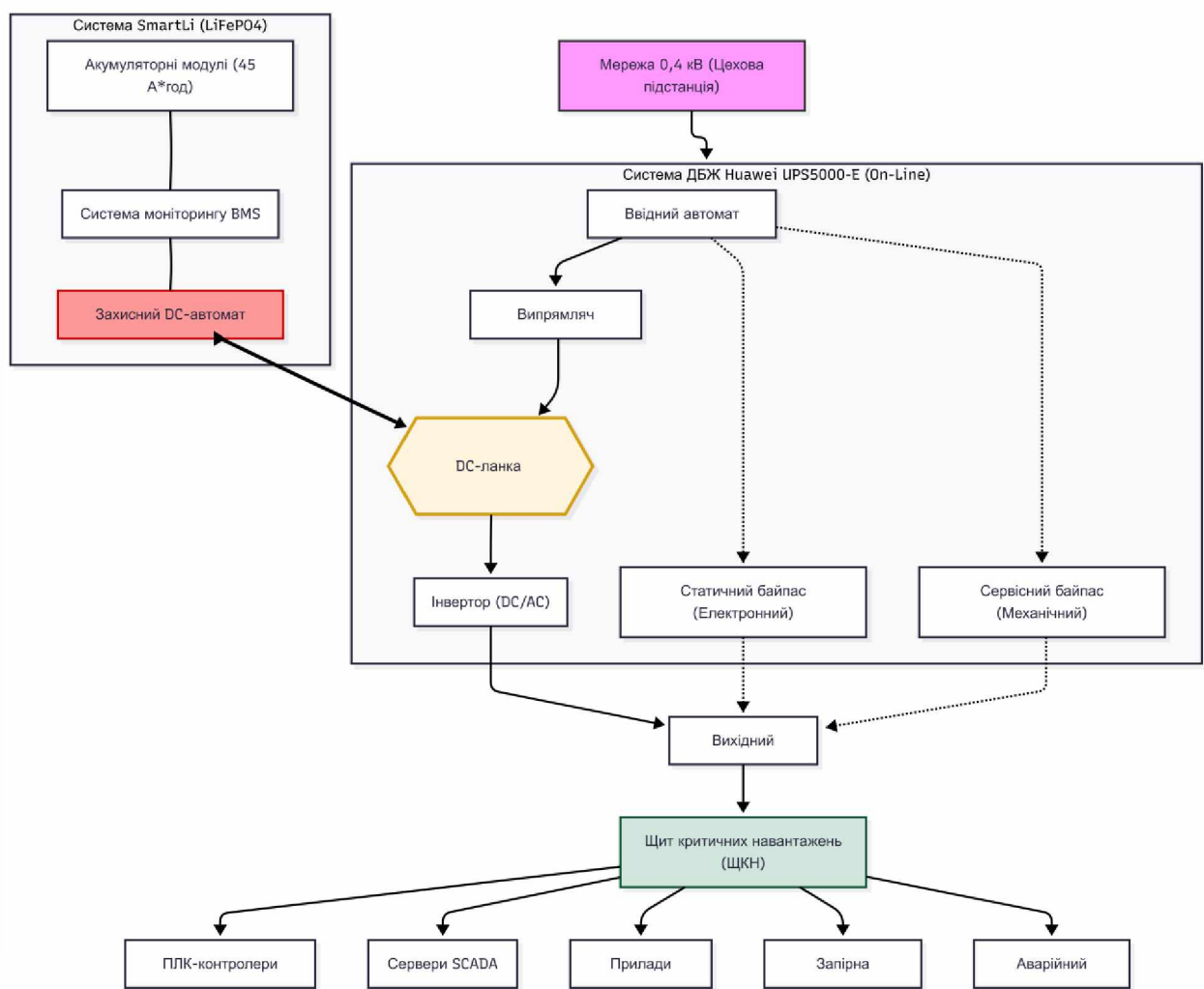


Рисунок 4.1 - Структурна схема проектованої системи

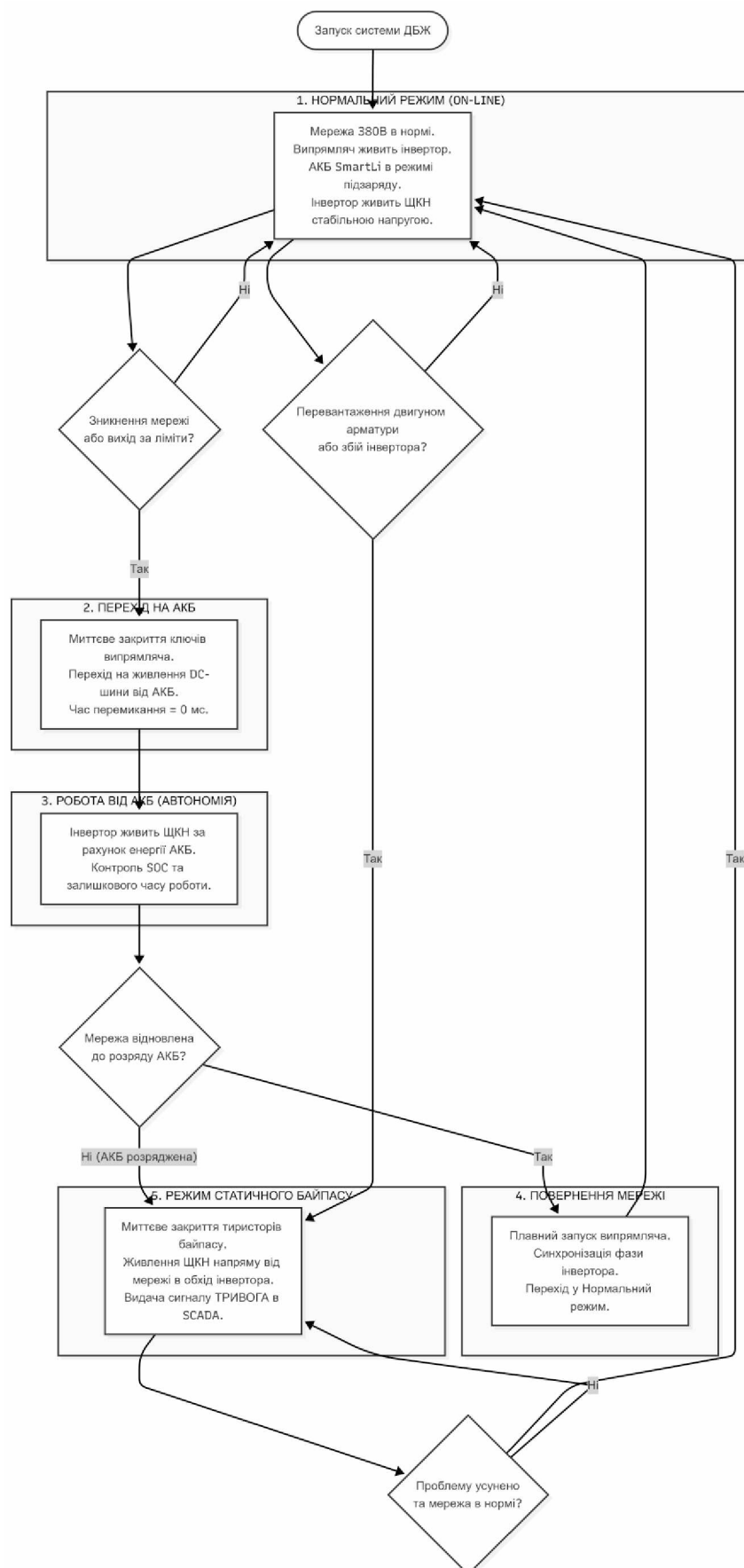


Рисунок 4.2 – Блок--схема режимів роботи: нормальний режим, перехід на АКБ, робота від АКБ, повернення мережі, байпас.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12

Арк.

66

В принципі така структура демонструє повну координацію між силовими елементами та системами резервування. Використання виділеного ЩКН дозволяє локалізувати групу А та забезпечити селективність захисту. Дуже важливо для виплавки чавуну Така структурна побудова є фундаментом для подальшого вибору марок кабелів та налаштування параметрів інтелектуального моніторингу, оскільки вона чітко визначає всі фізичні та логічні зв'язки в енергосистемі.

4.2 Однолінійна схема підключення

Після розроблення загальної структури системи резервного електроживлення необхідно деталізувати підключення основного обладнання у вигляді однолінійної електричної схеми. Така схема дозволяє показати послідовність розташування апаратів захисту, комутаційних пристроїв та основних елементів системи без надмірного ускладнення креслення окремими фазами.

Графічний матеріал однолінійної схеми електричних з'єднань комплексу безперебійного живлення (рисунок 4.3) відображає технічну реалізацію силових і захисних вузлів у трифазному виконанні. Схема деталізує внутрішню структуру On-Line ДБЖ, ланцюги акумуляторних батарей, байпас лінії та розподільчі шини Щита критичних навантажень (ЩКН) 0,4 кВ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

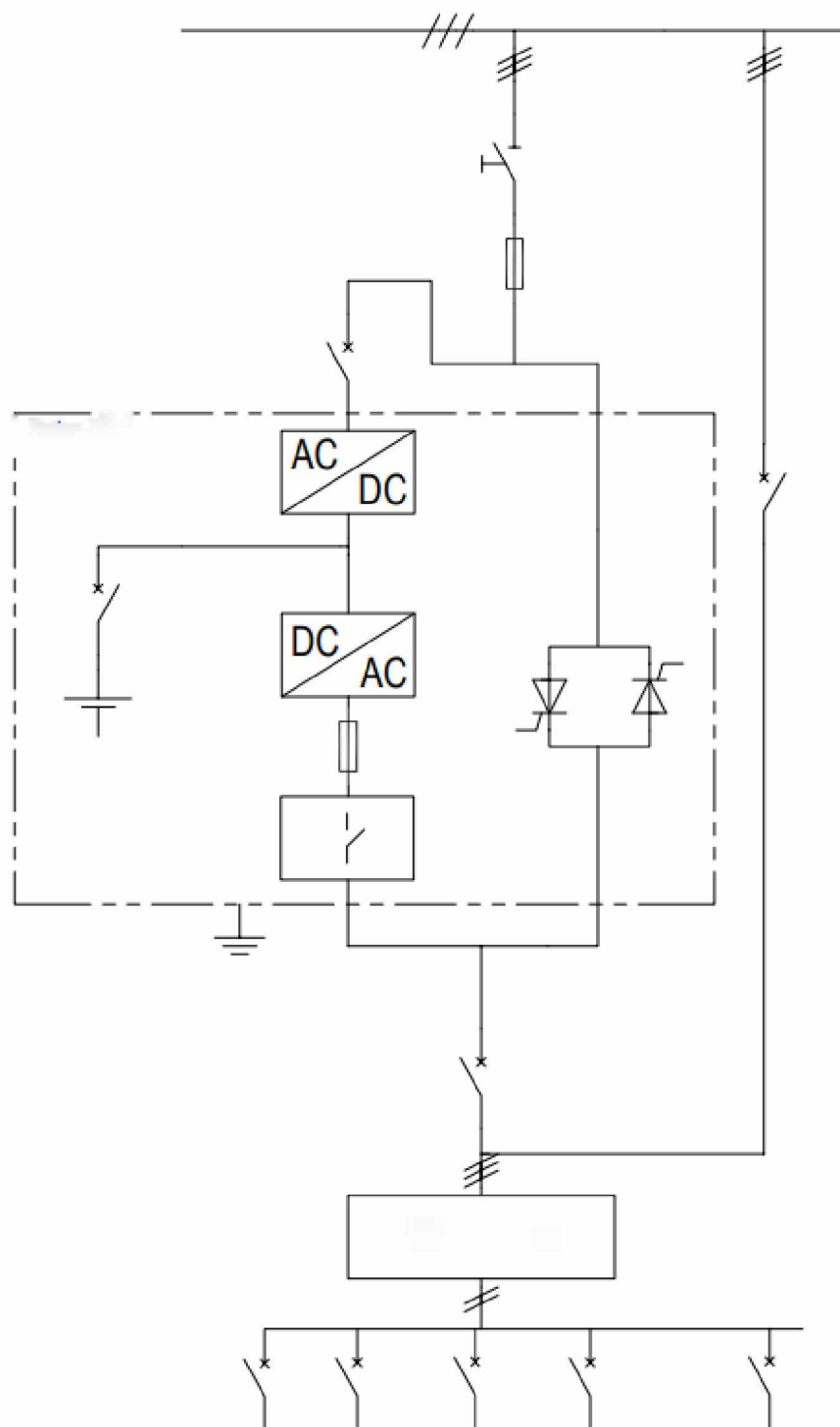


Рисунок 4.3 – Однолінійна схема трифазного ДБЖ

Крім основного тракту живлення передбачається статичний та сервісний байпас. Перший використовується для автоматичного переведення навантаження на мережу у випадку несправності ДБЖ або перевантаження

інвертора, другий для проведення регламентних робіт без відключення споживачів.

4.3 Розрахунок і вибір кабелів

Проектування кабельного господарства для інтеграції комплексу безперебійного живлення системи автоматизації доменної печі базується на жорсткому дотриманні вимог Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) та стандартів екологічної і пожежної безпеки промислових підприємств. Технічно правильний вибір перерізу та марки провідників гарантує мінімізацію втрат активної потужності, виключає аварійний перегрів ізоляції під час тривалих перевантажень та забезпечує живучість ланцюгів керування Group A при виникненні позаштатних ситуацій у цеху. Розрахунок та вибір провідників виконується індивідуально для трьох функціональних зон системи: входних ліній змінного струму (АС) до ДБЖ, вихідних ліній змінного струму від ДБЖ до ЩКН і споживачів, а також силової лінії постійного струму (DC) між ДБЖ та акумуляторним кабінетом Huawei SmartLi.

Для першої зони — входних АС-кабелів змінного струму від цехового ГРЩ до вводу випрямляча ДБЖ Huawei UPS5000-E — розрахунковим параметром є максимальний трифазний входний струм, обчислений у підрозділі 3.7, який з урахуванням потужності заряду літєвих батарей становить $I_{\text{вх.макс}} = 27,17, \text{А}$. Проте, за умовою механічної міцності та зважаючи на встановлену габаритну потужність шафи ДБЖ у 30 кВА (повний входний струм до 43,3 А), захисний ввідний апарат QF1 було обрано номіналом 63 А. Отже, тривалий допустимий струм кабелю ($I_{\text{доп}}$) повинен надійно координуватися з номіналом автомата. За умовами прокладання в металургійному цеху приймається групове розміщення кабелів у закритому перфорованому металевому лотку. Для забезпечення низького димовиділення та стійкості до розповсюдження полум'я обирається силовий трифазний кабель із мідними жилами та ПВХ-ізоляцією зниженої горючості марки

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

ВВГнг-LS. Врахую поправковий коефіцієнт на групове прокладання в лотку $k=0,85$ За таблицями ПУЕ для струму захисного апарату 63 А.

Мінімально допустимий переріз мідної жили становить:

$$S_{\text{вх}} = 16 \text{ мм}^2$$

$$I_{\text{доп}} = 75 \cdot 0,85 = 63,75 \text{ А}$$

$$63,75 \text{ А} > 63 \text{ А}$$

Для другої зони вихідних АС-кабелів від ДБЖ до ЩКН розрахунковий номінальний струм навантаження становить $I_{\text{вих.ном}} = 29,86 \text{ А}$ під захистом автомата QF2 номіналом 40 А. Для цієї магістралі за умовою нагріву та механічної доцільності обирається мідний кабель марки ВВГнг-LS перерізом $S_{\text{вих}} = 10 \text{ мм}^2$, для якого тривалий допустимий струм становить $I_{\text{доп}} = 55 \text{ А}$, що повністю задовольняє нерівність ПУЕ ($55 \text{ А} > 40 \text{ А}$). Особливо уважно вибираю групові кабелі від шин ЩКН до кінцевих споживачів, зокрема до найбільш відповідального вузла — електропривода запірної арматури безпеки (лінійний автомат 16 А, тип D). Оскільки цей привід повинен гарантовано спрацювати на закриття газопроводів та контурів охолодження доменної печі навіть в умовах розвиненої пожежі у цеху, використання стандартних кабелів тут є неприпустимим. Для цієї лінії обирається спеціалізований безгалогенний вогнестійкий кабель із мідними жилами марки (N)HXH FE180/E90 перерізом $4 \times 2,5 \text{ мм}^2$. Він здатний зберігати ізоляційні властивості (не замикати) протягом 180 хвилин безпосередньої дії відкритого вогню та забезпечувати працездатність лінії протягом 90 хвилин, що цілком достатньо для безпечного зупину доменного агрегату. Для ліній живлення ПЛК та серверів SCADA через їхнє внутрішнє щитове розміщення застосовується гнучкий провід марки ПВ-3 (НГ-Д) перерізом $2,5 \text{ мм}^2$

Для третьої зони силової DC-лінії постійного струму між ДБЖ та акумуляторною шафою Huawei SmartLi розрахунок виконано у підрозділі 3.5 на основі максимального струму розряду елементів в кінці автономного циклу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

який дорівнює $I_{dc.макс} = 35,94$ А. Для прокладання ланки постійного струму в межах однієї щитової приймається одножильний гнучкий кабель марки РВГ (або спеціалізований сонячний/батарейний кабель Solar/Battery PV-Cable) з підвищеною хімічною та термічною стійкістю ізоляції. За критерієм мінімізації втрат та нагріву переріз провідників DC-ланки визначено $S_{dc} = 10 \text{ мм}^2$ ($I_{доп} = 55$ А), що задовольняє умову захисту автоматом постійного струму на 50 А.

Виконую перевірку перевірку обраного вхідного кабелю ВВГнг-LS 5х16 мм²:

$$\Delta U_{AC} = \sqrt{3} \cdot I_{вх.макс} \cdot L_{вх} \cdot \frac{\rho \cdot \cos \varphi_{сер}}{S_{вх}} \quad (4.1)$$

$$\Delta U_{AC} = \sqrt{3} \cdot 27,17 \cdot 45 \cdot \frac{0,0178 \cdot 0,84}{16} = \frac{31,657}{16} = 1,98 \text{ В}$$

Визначаю відносну втрату напруги у відсотках відносно номінальної лінійної напруги мережі 400 В:

$$\Delta U_{\%AC} = \frac{\Delta U_{AC}}{U_{лін}} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

$$\Delta U_{\%AC} = \frac{1,98}{400} \cdot 100\% = 0,5 \%$$

Отримане значення відносного падіння напруги на ввідній магістралі становить всього 0,5 %, що є істотно меншим за максимально допустиму за ПУЕ інженерну норму у 5 %.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

Кабельний журнал та відомість силових ліній проекту

Таблиця 4.2

Функціональна зона	Ділянка підключення	Розрахунковий струм, А	Марка кабелю / Провідника	Кількість та переріз жил, мм ²	Спосіб прокладання лінії
АС-Ввід ДБЖ	Від ГРЩ підстанції до ДБЖ	27,17 (ввід 63А)	ВВГнг-LS	5G16	В перфорованому металевому лотку
ДС-Ланка АКБ	Від шафи SmartLi до ДБЖ	35,94 (автомат 50А)	РВГ (DC-серія)	2 × (1 × 10)	В гнучкій гофрованій трубі
АС-Вихід ДБЖ	Від виходу ДБЖ до ЩКН	29,86 (автомат 40А)	ВВГнг-LS	5G10	В перфорованому металевому лотку
Лінія споживача 1	Від ЩКН до ПЛК-контролерів	4,55 (автомат 10А)	ПВ-3 (нг-Д)	3 × 2,5	В пластиковому кабель-каналі щита
Лінія споживача 2	Від ЩКН до серверів SCADA	4,10 (автомат 10А)	ПВ-3 (нг-Д)	3 × 2,5	В пластиковому кабель-каналі щита
Лінія споживача 5	Від ЩКН до запірної арматури	7,04 (\$I_{\text{пуск}}=24,64\$)	(N)НХН FE180/E90	4 × 2,5	По протипожежній трасі в лотку

На мою думку така кабельна система повністю задовольняє критерії термічної стійкості, пожежної безпеки промислових об'єктів та гарантує стабільні рівні напруги на клеммах чутливої мікропроцесорної техніки КВПіА.

4.4 Вибір апаратів захисту

Вибір та координація комутаційно-захисної апаратури комплексу безперебійного живлення є критично важливим етапом проектування системи релейного захисту та автоматики (РЗА) доменного цеху. Специфіка умов експлуатації апаратів захисту на металургійному підприємстві характеризується підвищеною вібрацією, можливістю виникнення тривалих високотемпературних режимів та високими рівнями струмів короткого замикання (КЗ). Комутаційні апарати повинні не лише надійно пропускати тривалі робочі струми навантаження та заряду, але й мати відповідну граничну комутаційну здатність (ГКЗ), здатну локалізувати аварійні процеси без руйнування самого апарата. Для забезпечення повної технічної безпеки та безвідмовності системи виконано комплексний вибір апаратів захисту для змінної (АС) та постійної (DC) частин електротехнічного комплексу.

Для вхідного кола змінного струму, де максимальний розрахунковий струм становить $I_{\text{вх.макс}} = 27,17$, а з урахуванням повної габаритної потужності модульного ДБЖ 30 кВА струм може досягати 43,3 А, обираю триполюсний автоматичний вимикач вводу QF1 номіналом 63 А серії Acti9 iC60N виробника Schneider Electric. Вибір серії iC60N обґрунтований її високою граничною комутаційною здатністю, яка становить $I_{\text{cu}} = 10$ кА при напрузі 400 В, що повністю перекриває розрахункові струми КЗ на шинах цехової підстанції. Автомат вибирається з часо-струмовою характеристикою типу «С». Він забезпечує надійне утримання апарата при короткочасних мережевих коливаннях. Для виходу ДБЖ на шини ЩКН, де номінальний робочий струм дорівнює $I_{\text{вих.ном}} = 29,86$ А. Аналогічно обираю триполюсний автоматичний вимикач QF2 номіналом $I_{\text{ном}} = 40$ А серії iC60N з характеристикою «С». Виконана координація між вхідним (63 А) та вихідним (40 А) автоматами забезпечує надійну струмову селективність у зоні перевантажень.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливі, підвищені вимоги висуваються до захисної апаратури ланки постійного струму (DC-частини) між інвертором ДБЖ та літій-залізо-фосфатним акумуляторним кабінетом Huawei SmartLi. Розрахунковий максимальний струм розряду батареї становить $I_{dc, макс} = 35,94$ А, а номінальна робоча напруга DC-шини дорівнює 480 В. Оскільки постійний струм не проходить через нульове значення, виникнення електричної дуги при розмиканні контактів під навантаженням є вкрай небезпечним і може призвести до вигорання всього батарейного масиву. Для цієї ділянки обираю спеціалізований двополюсний автоматичний вимикач постійного струму серії Acti9 C60H-DC номіналом 50 А із робочою напругою до 500 В DC. Конструкція контактної групи цього апарата містить постійні магніти (магнітне дуття), які примусово втягують виниклу дугу в подовжені дугогасні камери, забезпечуючи швидке її гасіння. Гранична вимикаюча здатність апарата C60H-DC на постійному струмі становить $I_{cu} = 6$ кА при напрузі 500 В. Технічно миттєве та безпечне розривання ланцюга у разі внутрішнього замикання в шафі АКБ.

Для захисту напівпровідникових випрямних та інверторних модулів ДБЖ від високоамплітудних атмосферних (грозових) або індустріальних комутаційних сплесків напруги, спричинених комутацією потужних дугових сталеплавильних печей чи високовольтних двигунів комбінату, на вводі системи паралельно силовим шинам інтегрується пристрій захисту від імпульсних перенапруг (ПЗП). Обирається трифазний ПЗП класу II серії iPRD40r (Schneider Electric) зі змінними картриджами, розрахований на максимальний розрядний струм $I_{max} = 40$ кА та рівень захисту напруги $U_p < 1,5$ кВ. Для реалізації схеми сервісного байпасу, що дозволяє виводити ДБЖ у плановий ремонт без переривання живлення ЩКН, обирається ручний триполюсний вимикач-роз'єднувач (рубильник) серії Compact INS100 номіналом 100 А, обладнаний механічним блокуванням.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

Для забезпечення миттєвого знеструмлення всієї системи безперебійного живлення у разі виникнення пожежі в приміщенні щитової або при виявленні термічного розгону акумуляторних комірок, в інженерний комплекс інтегрується пристрій аварійного відключення типу ЕРО (Emergency Power Off). Конструктивно цей захист реалізовано у вигляді винесеної на вхідні двері щитової кнопки грибоподібного типу з фіксацією та червоним підсвічуванням. Ланцюг ЕРО підключається безпосередньо до слабострумних портів плати управління ДБЖ Huawei UPS5000-E та до незалежних розчеплювачів ввідного автомата QF1 та акумуляторного автомата C60H-DC. При механічному натисканні кнопки ЕРО логічний контролер ДБЖ миттєво блокує імпульси керування IGBT-транзисторів інвертора та випрямляча, а на незалежні розчеплювачі подається напруга 24 В, що призводить до повного фізичного розмикання силових контактів АС-вводу та DC-ланки батарей, повністю ліквідуючи ризики подальшого поширення пожежі в електроустановці.

Відомість силових комутаційно-захисних апаратів

Таблиця 4.3

Маркування на схемах	Функціональне призначення апарата	Кількість полюсів	Номинальний струм / Напруга	Гранична комутаційна здатність	Тип розчеплювача / Характеристика	Заводська марка / Виробник
QF1	Захист АС-вводу випрямляча	3Р	63 А / 400 В АС	10 кА	Термомагнітний / Крива С	iC60H 3P 63A / Schneider Electric
QF2	Захист виходу ДБЖ на ЦКН	3Р	40 А / 400 В АС	10 кА	Термомагнітний / Крива С	iC60H 3P 40A / Schneider Electric

QF_DC	Захист DC-ланки АКБ SmartLi	2P	50 A / 500 B DC	6 кА	Спеціалізований DC / Крива C-DC	C60H-DC 2P 50A / Schneider Electric
QS1	Рубильник сервісного байпасу	3P	100 A / 690 B AC	—	Механічний ручний привід	Compact INS100 / Schneider Electric
FV1	Обмежувач перенапруг (ПЗПП)	3P	$I_{\text{nom}}=20\text{ кА}$, $I_{\text{max}}=40\text{ кА}$	—	Варисторний / Клас II	iPRD40r 3P / Schneider Electric
SB1 (EPO)	Кнопка аварійного зупину	1НО+1НЗ	10 A / 230 B	—	Поворотне розблокування	Harmony XB5 / Schneider Electric

Правильний вибір апаратів захисту, виконаний у даному підрозділі, унеможливорює пошкодження силового обладнання при тривалих перевантаженнях, забезпечує надійне дугогасіння в колах постійного струму високої напруги літєвих батарей. Гарантує захист мікропроцесорної техніки від імпульсних перенапруг і створює умови для швидкої локалізації аварійних ситуацій в умовах металургійного комплексу.

4.5 Заземлення, вирівнювання потенціалів і електробезпека

Для гарантування безпеки експлуатаційного персоналу та захисту мікропроцесорної техніки КВПіА від високочастотних завад в умовах доменного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» реалізовано трифазну систему заземлення типу TN-S із розділеними робочим (N) та захисним (PE) провідниками. Захисному заземленню підлягають усі металеві елементи конструкцій, які нормативно не перебувають під напругою, але можуть опинитися під нею внаслідок пробоя ізоляції: несучі каркаси та двері шафи ДБЖ Huawei UPS5000-E, металевий корпус акумуляторного кабінету Huawei

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

SmartLi, каркас Щита критичних навантажень (ЩКН), а також суцільні перфоровані кабельні лотки. Приєднання обладнання до РЕ-магістралі виконується радіально (шлейфове з'єднання суворо заборонено ПУЕ) за допомогою гнучких мідних провідників марки ПВ-3 в жовто-зеленій ізоляції перерізом не менше 16 мм² для шаф та 4 мм² для секцій лотків. Сумарний опір розтіканню струму заземлювального пристрою цеху становить 4 Ом.

У приміщенні електрощитової монтується Головна заземлювальна шина (ГЗШ), виконана з мідної смуги перерізом 40 мм, яка формує контур додаткового вирівнювання потенціалів. До ГЗШ підключаються всі РЕ-провідники силового обладнання, корпуси кондиціонерів, елементи фальшпідлоги щитової та входні металеві двері, що повністю ліквідує ризик появи різниці потенціалів між суміжними металоконструкціями.

Усі захисні провідники та точки болтових з'єднань мають стандартизоване жовто-зелене маркування та графічні знаки заземлення. На лицьових панелях шаф наносяться постійні попереджувальні знаки «Обережно! Електрична напруга». Для запобігання помилковим діям персоналу ручний перемикач сервісного байпасу QS1 обладнується механічним замком-блокуванням, який унеможливорює переведення рубильника в положення сервісного байпасу до моменту електронного переходу ДБЖ на статичний байпас. Двері акумуляторної шафи SmartLi оснащені кінцевими вимикачами, інтегрованими в логіку РЗА: при спробі несанкціонованого відкриття дверей автоматично видається сигнал на верхній рівень SCADA, а внутрішній DC-автомат розмикає ланцюг, знеструмлюючи відкриті шини.

До оперативного керування та регламентного огляду комплексу допускаються працівники КВПіА з групою з електробезпеки не нижче III. Проведення ремонтних робіт або заміна силових модулів виконується виключно за нарядом-допуском бригадою у складі не менше двох осіб із групою не нижче IV. Перед початком робіт обладнання переводиться на

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

сервісний байпас і повністю знеструмлюється автоматами QF1 та QF_DC. Після відключення витримується нормативний час (не менше 5 хвилин) для безпечного автоматичного розряду внутрішніх конденсаторів високої ємності DC-ланки через розрядні резистори, проводиться перевірка відсутності напруги, вивішуються заборонні плакати «Не вмикати! Працюють люди» та встановлюються переносні заземлення.

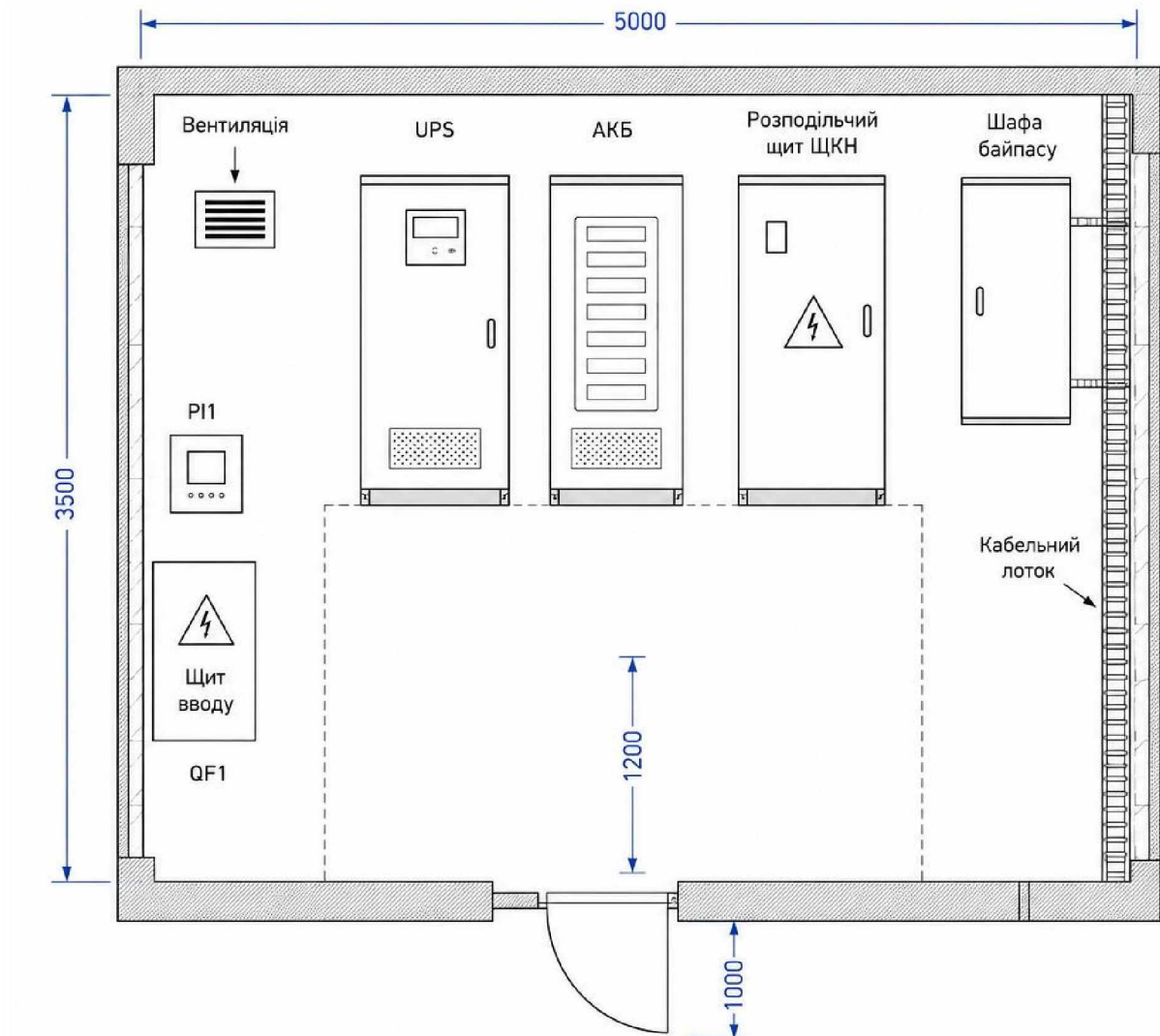


Рисунок 4.4- Спрощення схема розміщення обладнання в електротехнічному приміщенні

4.6 Моніторинг і діагностика

Безперервний контроль технічного стану комплексу безперебійного живлення в загальній структурі КВПіА доменного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» забезпечує превентивну діагностику та безаварійну роботу систем автоматизації Group A. Локальна мікропроцесорна архітектура керування ДБЖ Huawei UPS5000-E та інтелектуальні плати управління батарейної системи BMS виконують у реальному часі безперервний збір та аналіз технологічних параметрів, розподілених за такими ключовими контурами:

- *Параметри АС-мережі:* випрямляч та інвертор постійно контролюють діючі значення трифазної вхідної та вихідної напруги, фазні струми, частоту мережі, коефіцієнт завантаження інвертора, а також поточний стан байпасних ліній (фіксація роботи через інвертор, автоматичний перехід на статичний байпас чи увімкнення ручного сервісного рубильника QS1).
- *Параметри DC-ланки та АКБ:* система BMS здійснює покоміркове сканування літій-залізо-фосфатного масиву Huawei SmartLi, реєструючи загальну напругу DC-шини (480 В), величину і напрямок струму (заряд/розряд), поточний рівень заряду (State of Charge — SOC, %) та обчислює відносний залишковий час автономної роботи системи при поточному навантаженні цеху.
- *Тепловий контроль та сигналізація:* температурні датчики на радіаторах IGBT-модулів та всередині акумуляторних касет реєструють тепловий режим (попереджувальний сигнал при перевищенні +30 С° та аварійне відключення при +55 С°). Матриця аварійних подій фіксує задимлення, знос варисторів ПЗП, відмову вентиляторів охолодження або критичний розряд батареї (SOC нижче 20 %).

Передача всієї діагностичної та аварійної інформації на верхній рівень диспетчеризації цеху реалізується через інтегровану мережеву карту по

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

промислового протоколу Modbus TCP (або SNMP). Фізичне підключення ДБЖ до цехового комутатора виконується екранованим кабелем типу «кручена пара» марки FTP Cat5e, що гарантує високу заводозахисненість від електромагнітних полів цеху. На моніторі робочої станції SCADA-системи диспетчера доменного комплексу візуалізується інтерактивна мнемосхема ДБЖ із відображенням напрямків потоків енергії, трендів напруги, цифрових індикаторів часу автономії та світлозвукової сигналізації тривоги, що мінімізує час реакції персоналу на експлуатаційні відхилення.

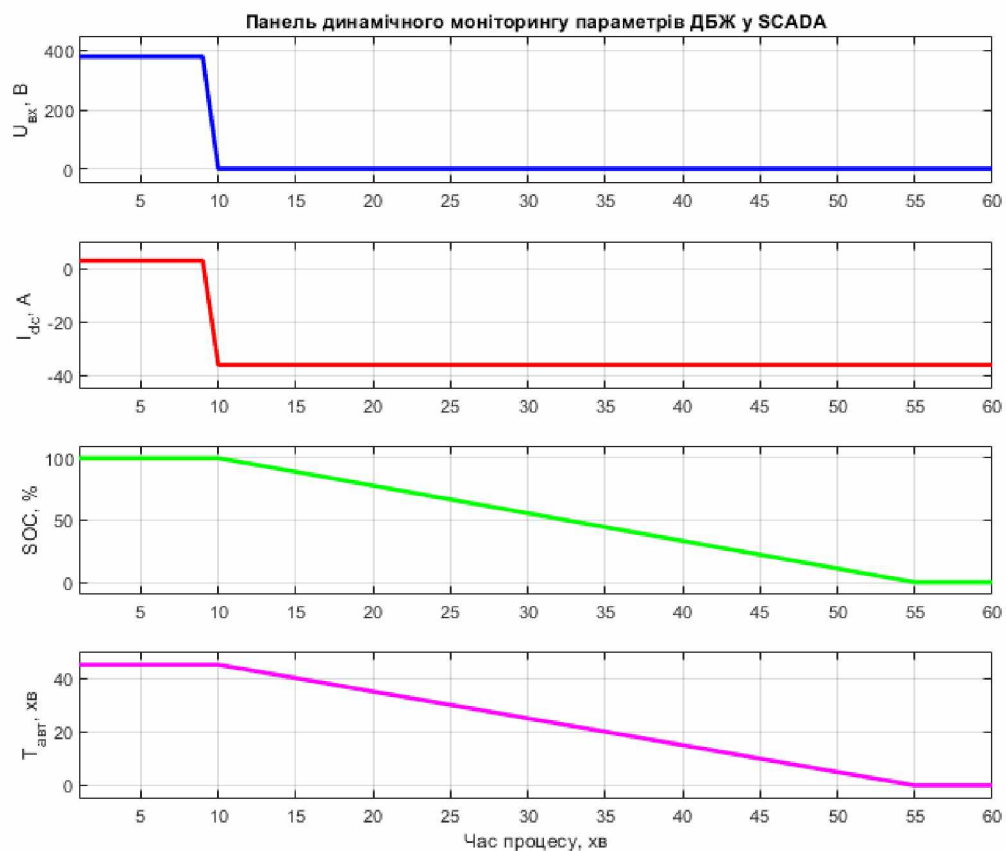


Рисунок 4.5 – Модель динамічного моніторингу ДБЖ

Отримані графіки математичного моделювання наочно відтворюють роботу інтерфейсу моніторингу. На 10-й хвилині, при падінні вхідної напруги до 0 В, датчики миттєво реєструють стрибок струму в DC-ланці від +2,87 А (режим підзаряду) до -35,94 (інтенсивний розряд), що свідчить про миттєвий перехід ДБЖ на автономну роботу.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі магістерської роботи здійснено комплексний перехід від теоретичних розрахунків до практичного проектного рішення системи безперебійного живлення для автоматизації доменної печі ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». На основі розробленої принципової однолінійної схеми сформовано відмовостійку архітектуру з нульовим часом перемикання, яка об'єднує On-Line ДБЖ Huawei UPS5000-E потужністю 30 кВА, літійову систему Huawei SmartLi (480 В DC), лінії статичного та сервісного байпасів і виділений Щит критичних навантажень (ЩКН). Для комутаційно-захисного апарату вхідних та вихідних АС-ліній обґрунтовано вибір трифазних автоматичних вимикачів серії Acti9 iC60H (63 А та 40 А) з граничною комутаційною здатністю 10 кА. Для DC-ланки батарейного кабінету підібрано спеціалізований двополюсний автомат C60H-DC (50 А) із системою магнітного дуття для надійного гасіння дуги. Безпеку обладнання підсилено інтеграцією варисторного ПЗІП класу II (iPRD40r) для захисту від мережеских сплесків напруги, контуром аварійного відключення типу ЕРО, ну і заземлення типу TN-S.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

Розділ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ, ЕКСПЛУАТАЦІЙНЕ ТА БЕЗПЕКОВЕ ОБґРУНТУВАННЯ

5.1 Порівняння варіантів системи

Обґрунтування практичної доцільності та економічної ефективності інженерних рішень є обов'язковим етапом проектування систем промислової автоматизації (КВПіА) для об'єктів Особливої групи А металургійного виробництва. Впровадження комплексу безперебійного живлення для засобів керування доменної печі повинно забезпечувати оптимальний баланс між капітальними інтраінвестиціями (вартістю обладнання), надійністю напівпровідникових вузлів, тривалістю автономного функціонування та складністю подальшого сервісного обслуговування. Для визначення найбільш раціональної конфігурації технічного рішення у даному підрозділі виконано багатокритеріальний аналіз та порівняння трьох альтернативних варіантів побудови системи: мінімального, базового (прийнятого у проекті) та посиленого. Кожен із варіантів орієнтований на виконання конкретного обсягу завдань протиаварійного захисту і розрізняється за типом акумуляторних батарей, часом автономії, складом комутаційної апаратури та рівнем цифрової інтеграції.

Мінімальний варіант системи безперебійного живлення орієнтований виключно на короткочасне резервування протягом 10 хвилин, що є достатнім лише для безаварійного переведення промислових контролерів (ПЛК) та серверів SCADA в безпечний режим із збереженням поточних баз даних технологічного процесу. Технічна реалізація цього варіанта базується на застосуванні стандартного ДБЖ лінійно-інтерактивного типу зі спрощеною схемою комутації та використанням стандартних

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 5	Літ.	Арк.	Аркуші
Розробив	Стрілець Р.							
Перевірів	Пересунько						82	99
						КНУ гр. ЕЕМ-22-2		
Н. Контр.	Пересунько							
Затвердж.	Пересунько І.							

аккумуляторних батарей (VRLA AGM). Економічною перевагою мінімального варіанта є низька початкова капітальна вартість обладнання, проте експлуатаційні недоліки в умовах гарячого доменного цеху роблять його технічно неефективним. Свинцево-кислотні АКБ мають низьку термічну стійкість і при підвищенні температури в щитовій вище +25 С° втрачають до 50 % свого номінального ресурсу, що вимагає їх заміни кожні 2–3 роки. Крім того, час перемикання лінійно-інтерактивного ДБЖ на батарею становить від 4 до 10 мс, що є критичним для чутливих мікропроцесорних модулів КВПіА доменної печі та може спровокувати збій у циклі збору даних контролерами. Малий час автономії (10 хвилин) повністю виключає можливість живлення потужних приводів запірної арматури, залишаючи технологічний агрегат незахищеним від теплових та газових ударів при повному знеструмленні цеху.

Базовий варіант, який прийнято і детально розраховано у даному дипломному проекті, базується на впровадженні трифазного модульного ДБЖ топології Online (подвійного перетворення) Huawei UPS5000-E потужністю 30 кВА та інтелектуальної літій-залізо-фосфатної (LiFePO₄) системи Huawei SmartLi ємністю 45 А·год. Ця конфігурація забезпечує стабільний час автономної роботи системи протягом 45 хвилин при номінальному навантаженні 11,36 кВт, що дозволяє не лише підтримувати повну працездатність ПЛК, датчиків та серверів SCADA, але й гарантує успішний запуск і гарантоване відпрацювання алгоритмів закриття запірної арматури безпеки. Використання технології Online забезпечує нульовий час перемикання (0 мс) на роботу від батарей та ідеальну синусоїдальну напругу виходу. Акумулятори LiFePO₄ мають високу термічну стабільність (надійна робота до +40 С° без деградації), термін служби до 10–15 років (понад 5000 циклів розряду) та обладнані вбудованою багаторівневою системою захисту й балансування BMS. Цифрова інтеграція по протоколу Modbus TCP дозволяє здійснювати безперервну превентивну діагностику та видавати точний прогноз часу автономії на пульт диспетчера. Капітальні витрати на реалізацію базового варіанта є середніми, проте за рахунок тривалого життєвого циклу

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

батареї та відсутності витрат на їх часту заміну, сукупна вартість володіння системою (ТСО) є мінімальною.

Посилений варіант системи розрахований на розширене резервування об'єкта протягом 60–90 хвилин, що забезпечує утримання всіх критичних систем автоматизації доменної печі аж до моменту запуску аварійних дизель-генераторів підприємства або відновлення електропостачання від резервних ліній 110 кВ. Технічно цей варіант повторює структуру базового Online ДБЖ, але потребує подвоєння ємності літій-залізо-фосфатного масиву (встановлення двох паралельних шаф SmartLi-45Ah або однієї габаритної шафи на 90 А·год), а також впровадження дубльованої системи кондиціонування приміщення електрощитової для гарантування абсолютного теплового відведення. Посилений варіант володіє найвищим індексом надійності та забезпечує максимальну безпеку металургійного процесу, проте його капітальна вартість зростає майже вдвічі порівняно з базовим рішенням. Така конфігурація створює надлишковий технічний резерв, економічна доцільність якого є сумнівною, оскільки стандартний час розгортання та виходу на режим цехової дизель-генераторної установки не перевищує 15–20 хвилин.

Порівняльна матриця варіантів системи безперебійного живлення

Таблиця 5.1

Техніко-економічний критерій порівняння	Мінімальний варіант системи	Базовий варіант (Проектне рішення)	Посилений варіант системи
Топологія побудови ДБЖ	Line-Interactive	On-Line (Double Conversion)	On-Line (Double Conversion)
Тип акумуляторних батарей	Свинцево-кислотні VRLA AGM	Літій-залізо-фосфатні LiFePO4	Літій-залізо-фосфатні LiFePO4
Час автономної роботи споживачів	10 хвилин	45 хвилин	90 хвилин

Час перемикання на АКБ, мс	4-10 мс (є комутаційна пауза)	0 мс (миттєво)	0 мс (миттєво)
Термін служби батарейного масиву	2–3 роки (в умовах цеху)	10–15 років (понад 5000 циклів)	10–15 років (понад 5000 циклів)
Складність експлуатації та сервісу	Висока (потребує частих замін АКБ)	Мінімальна (інтелектуальна BMS)	Середня (обслуговування 2-х шаф)
Інтеграція в SCADA цеху	Відсутня (локальні сухі контакти)	Повна (Modbus TCP через FTP Cat5e)	Повна (Modbus TCP, дубльовані канали)
Рівень пожежної та тех. безпеки	Низький (ризик виділення водню)	Високий (BMS контроль, ЕРО зупин)	Максимальний (BMS, ЕРО, клімат)
Капітальні інвестиції (CAPEX)	Низькі	Середні	Високі
Експлуатаційні витрати (OPEX)	Високі (через ремонти та заміни)	Мінімальні (обладнання "поставив-забув")	Помірні (обслуговування клімату)

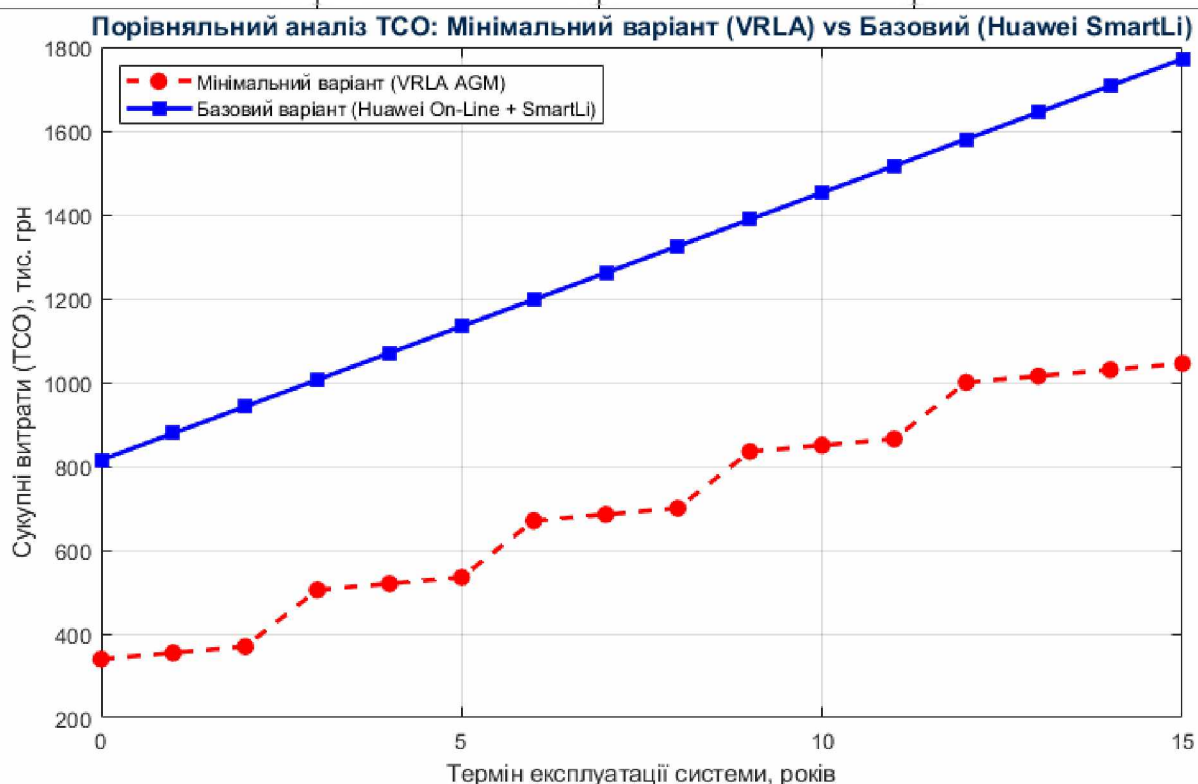


Рисунок 5.1 - Графік порівняльного аналізу TCO

Таблиця 5.1 демонструє в результаті мінімальний варіант не задовольняє вимогам технологічної безпеки Особливої групи А доменного виробництва

через наявність комутаційної паузи та неспроможність жити привід запірної арматури. Посилений варіант є економічно перевитратним через надлишкову ємність АКБ. Таким чином, обраний у проекті *базовий варіант* на базі On-Line ДБЖ потужністю 30 кВА та літєвої системи Huawei SmartLi є найбільш раціональним і збалансованим техніко-економічним рішенням, яке гарантує максимальну експлуатаційну надійність при оптимальних фінансових інвестиціях.

5.2 Оцінка вартості обладнання та капітальних витрат

Для практичної реалізації розробленого проекту системи безперебійного живлення засобів автоматизації доменної печі ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» виконано детальний розрахунок капітальних інвестицій (CAPEX). Кошторисна вартість проекту враховує повний спектр витрат, що включає специфіковане силове обладнання, акумуляторні кабінети, кабельно-провідникову продукцію, комутаційно-захисну апаратуру АС- та DC-трактів, додаткові монтажні матеріали, а також комплекс сервісних, монтажних та пусконаладжувальних робіт, що виконуються спеціалізованою підрядною організацією.

Розрахунок базової вартості основних компонентів виконано на основі поточних ринкових прайс-листів офіційних дистриб'юторів електротехнічного обладнання (включаючи Schneider Electric та Huawei Digital Power в Україні). Вартість монтажних компонентів, металовиробів та супутніх будівельних матеріалів прийнята усереднено на рівні 8 % від загальної вартості апаратної частини проекту. На виконання пусконаладжувальних робіт, інженерного тестування плат РЗА та інтеграції карт моніторингу в діючу цехову SCADA-систему закладено 10 % від вартості всього комплексу обладнання.

Усі статті витрат, технічні позиції, одиниці виміру, кількісні показники та орієнтовна вартість станом на 2026 рік звів в кошторис мого проекту (таблиця 5.2).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

Кошторисна відомість капітальних витрат на реалізацію системи ДБЖ

Таблиця 5.2

№ п/п	Найменування обладнання, матеріалів або виду робіт	Марка / Модель / Технічні дані	К-сть	Од. вим.	Ціна за од., грн	Загальна вартість, грн
1	Силове та акумуляторне обладнання					
1.1	Модульний On-Line ДБЖ (силова шафа)	Huawei UPS5000-E-30K-BF (30 кВА)	1	шт.	215 000	215 000
1.2	Інтелектуальний акумуляторний кабінет	Huawei SmartLi-45Ah (масив LiFePO4)	1	шт.	320 000	320 000
1.3	Локальний інтегрований модуль керування АКБ	Huawei SmartLi BMS (вбудований)	1	компл.	45 000	45 000
2	Щитове обладнання та захисна апаратура					
2.1	Щит критичних навантажень (металокорпус)	Schneider Electric Pragma (IP54)	1	шт.	14 500	14 500
2.2	Автоматичний вимикач АС-вводу (63 А, 3Р, 10кА)	Acti9 iC60H 3P 63A (Schneider)	1	шт.	3 800	3 800
2.3	Автоматичний вимикач АС-виходу (40 А, 3Р, 10кА)	Acti9 iC60H 3P 40A (Schneider)	1	шт.	3 100	3 100
2.4	Спеціалізований автомат DC-ланки (50 А, 2Р, 6кА)	Acti9 C60H-DC 2P 50A (Schneider)	1	шт.	6 400	6 400
2.5	Ручний перемикач сервісного байпасу (100 А)	Compact INS100 3P (Schneider)	1	шт.	8 200	8 200
2.6	Пристрій захисту від імпульсних перенапруг (ПЗІП)	Acti9 iPRD40r 3P (Класс II)	1	шт.	11 200	11 200
2.7	Кнопка аварійного відключення системи (ЕРО)	Harmony XB5 (1НО+1НЗ, Schneider)	1	шт.	1 900	1 900
3	Кабельно-провідникова продукція та мережа					
3.1	Кабель силовий АС-вводу мідний	ВВГнг-LS	45	м	380	17 100

3.2	Кабель силовий АС-виходу мідний	ВВГнг-LS	15	м	260	3 900
3.3	Провід силовий DC-ланки гнучкий хімічностійкий	РВГ	10	м	180	1 800
3.4	Вогнестійкий кабель живлення запірної арматури	(N)HХН FE180/E90	60	м	190	11 400
3.5	Екранована кручена пара для моніторингу SCADA	FTP Cat5e LSZH	80	м	45	3 600
4	Монтажні матеріали та супутні компоненти					
4.1	Кабельні траси, лотки, гофротруби, металовироби	Перфорований лоток, дюбелі, шини	1	компл.	25 000	25 000
4.2	Витратні матеріали, накінецьники, маркування	Клеми, термоусадка, гвинти	1	компл.	12 000	12 000
5	Монтажні та пусконаладжувальні роботи					
5.1	Будівельно-монтажні роботи та прокладання трас	Монтаж шаф, лотків, підключення	1	компл.	48 000	48 000
5.2	Пусконаладжувальні роботи та SCADA-інтеграція	Прошивка BMS, тести РЗА, Modbus	1	компл.	63 000	63 000
—	ЗАГАЛЬНА ВАРТІСТЬ ПРОЕКТУ (CAPEX)	Разом без ПДВ	—	—	—	814 900 грн

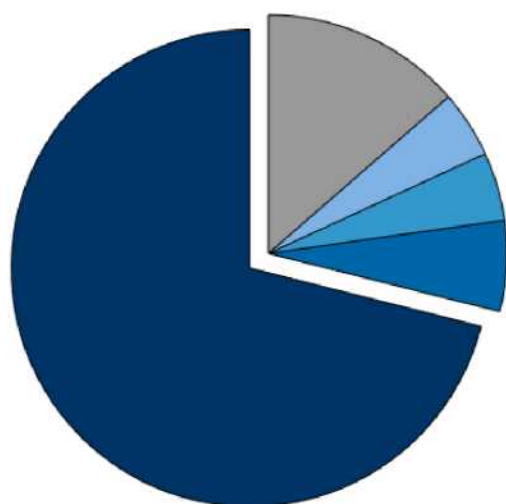


Рисунок 5.2 - Кругова діаграма капітальних витрат (CAPEX)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12

Арк.

88

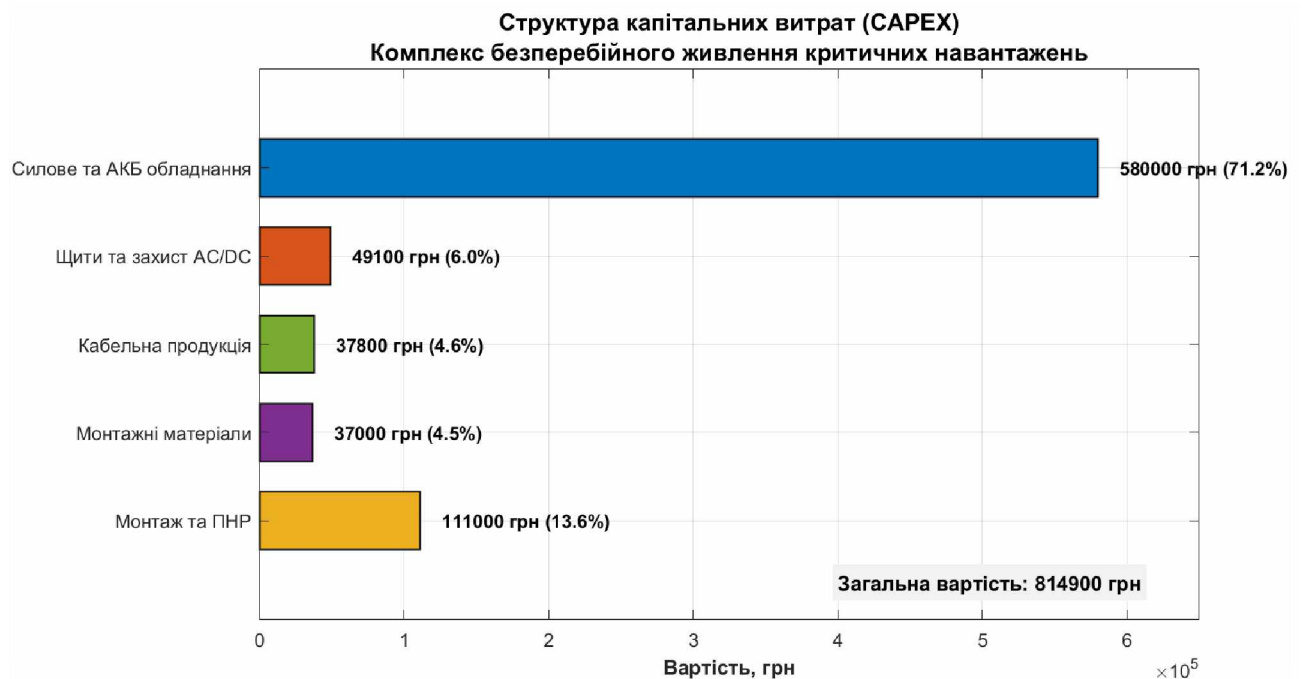


Рисунок 5.3 - Діаграма структури витрат по групах обладнання

Провівши аналіз таблиці 5.2 капітальні витрати на реалізацію системи безперебійного живлення становлять 814 900 грн. Очевидно найбільшу частку у структурі витрат займає силове та акумуляторне обладнання (близько 63 % від загальної вартості), що зумовлено застосуванням сучасних LifePo4 елементів із тривалим життєвим циклом (10–15 років); системою BMS. Я вважаю впровадження цих капітальних інвестицій є повністю виправданим на прикладі доменного виробництва «АрселорМіттал Кривий Ріг», оскільки попередження хоча б одного аварійного зупину доменної печі та виключення ризику заклинювання запірної арматури безпеки при знеструмленні дозволяє уникнути значно більших збитків. Такі збитки можуть перевищувати витрати на ДБЖ навіть в 2, а то і в 3 рази більші.

5.3 Оцінка експлуатаційних витрат

Формування операційних витрат (OPEX) на забезпечення безперервного функціонування комплексу безперебійного живлення системи КВПіА доменної печі є важливим етапом техніко-економічного аналізу. На відміну від свинцево-кислотних аналогів (VRLA AGM), які потребують частих замін та значних трудовитрат на обслуговування в агресивних умовах цеху ПАТ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

«АрселорМіттал Кривий Ріг», обрана літій-залізо-фосфатна система на базі On-Line ДБЖ Huawei UPS5000-E та акумуляторного кабінету SmartLi демонструє високу економічну ефективність у довгостроковій експлуатації. Розрахунок річних операційних витрат комплексу базується на врахуванні вартості технологічних втрат електроенергії в напівпровідникових трактах ДБЖ, витрат на кондиціонування та охолодження приміщення щитової, витрат на періодичне сервісне обслуговування, а також амортизаційних відрахувань на діагностику, калібрування BMS та випробування РЗА.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) сучасного модульного ДБЖ Huawei UPS5000-E у нормальному режимі становить 96 %, що означає втрату 4 % від поточної потужності навантаження у вигляді виділення тепла. При розрахунковому тривалому навантаженні засобів автоматизації 11,36 кВт, потужність внутрішніх втрат ДБЖ ($P_{\text{втр}}$) становить:

$$P_{\text{втр}} = P_{\text{нав}} \cdot (1 - \eta) \quad (5.1)$$

$$P_{\text{втр}} = 11,86 \cdot (1 - 0,96) = 0,454 \text{ кВт}$$

Зважаючи на безперервний цілодобовий і цілорічний режим роботи доменного виробництва (8760 годин на рік), річний обсяг втраченої в ДБЖ електроенергії ($W_{\text{ДБЖ}}$, кВт · год):

$$W_{\text{ДБЖ}} = P_{\text{втр}} \cdot 8760 \quad (5.2)$$

$$W_{\text{ДБЖ}} = 0,454 \cdot 8760 = 3977,04 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Другою статтею витрат є забезпечення кліматичного режиму (охолодження приміщення щитової). Теплова потужність 0,454 кВт, яка постійно виділяється ДБЖ, повинна компенсуватися промисловим прецизійним кондиціонером. Коефіцієнт енергоефективності сучасних систем охолодження (EER) становить приблизно 3,0, тобто для відведення 1 кВт теплової потужності компресор кондиціонера споживає з мережі 0,33 кВт електричної енергії.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Річне споживання енергії кондиціонером ($W_{\text{охол}}$, кВт · год) становить:

$$W_{\text{охол}} = \frac{P_{\text{втр}}}{3} \cdot 8760 \quad (5.3)$$

$$W_{\text{охол}} = \frac{0,454}{3} \cdot 8760 = 1322,76 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

На власні потреби, витрати комплексу сумарне річне споживання буде $3977,04 + 1322,76 = 5,2998$ кВт · год. Врахую діючий середній промисловий тариф (7,50 грн за кВт · год):

$$C_{\text{ен}} = 5,2998 \cdot 7,50 = 39\,748,50 \text{ грн}$$

Третя стаття операційних витрат буде періодичне технічне обслуговування, сервісна діагностика та випробування системи. Завдяки впровадженню інтелектуальної системи SmartLi BMS, яка виконує автоматичне покоміркове балансування літєвих елементів, безперервний моніторинг ємності та внутрішнього опору, відпадає потреба в проведенні щоквартальних важких ручних циклів розряду-заряду для перевірки ємності (як це обов'язково для VRLA батарей). Експлуатаційний регламент КВПіА передбачає проведення сервісних робіт раз на пів року силами підрядної організації або спеціалізованої лабораторії РЗА. Роботи включають тепловізійний контроль силових контактів, очищення вентиляційних каналів та фільтрів ДБЖ від дрібнодисперсного коксового пилу, інженерну перевірку логіки відсічки вимикачів, тестування контуру аварійного зупину ЕРО та калібрування вимірювальних датчиків. Вартість двох таких регламентних комплексів на рік, включаючи витратні матеріали, складає 24 000 грн.

До останньої четвертої включаю амортизаційні відрахування на заміну батарей. Оскільки розрахунковий термін служби літій-залізо-фосфатного масиву Huawei SmartLi становить 15 років (понад 5000 циклів при глибині розряду 80 %).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Структура річних експлуатаційних витрат (ОРЕХ) комплексу ДБЖ

Таблиця 5.3

Елемент експлуатаційних витрат	Розрахункова база / Технічний параметр	Річний обсяг / Кількість	Вартість одиниці, грн	Річні витрати, грн	Частка у структурі ОРЕХ
Втрати в ДБЖ	Напівпровідниковий тракт подвійного перетворення 96 %	3977,04 кВт·год	7,50	29 827,80	46,8 %
Кондиціонування	Відведення тепла від ДБЖ кондиціонером (EER = 3.0)	1322,76 кВт·год	7,50	9 920,70	15,6 %
Регламентне ТО	Очищення від пилу, протяжка контактів, тести РЗА	2 рази на рік	8 000,00	16 000,00	25,1 %
Діагностика та тести	Перевірка контуру ЕРО, калібрування ВМС та датчиків струму	1 раз на рік	8 000,00	8 000,00	12,5 %
Заміна АКБ	Літій-залізо-фосфатний масив (термін служби 15 років)	0 (не потребує)	—	0,00	0
РАЗОМ РІЧНИЙ ОРЕХ	Енергетичні втрати + Комплексний сервіс (без ПДВ)	—	—	63 748,50	100%

У підсумку таблиці 5.3 річні витрати на утримання проектованої системи безперебійного живлення становлять 63 748,50 грн.

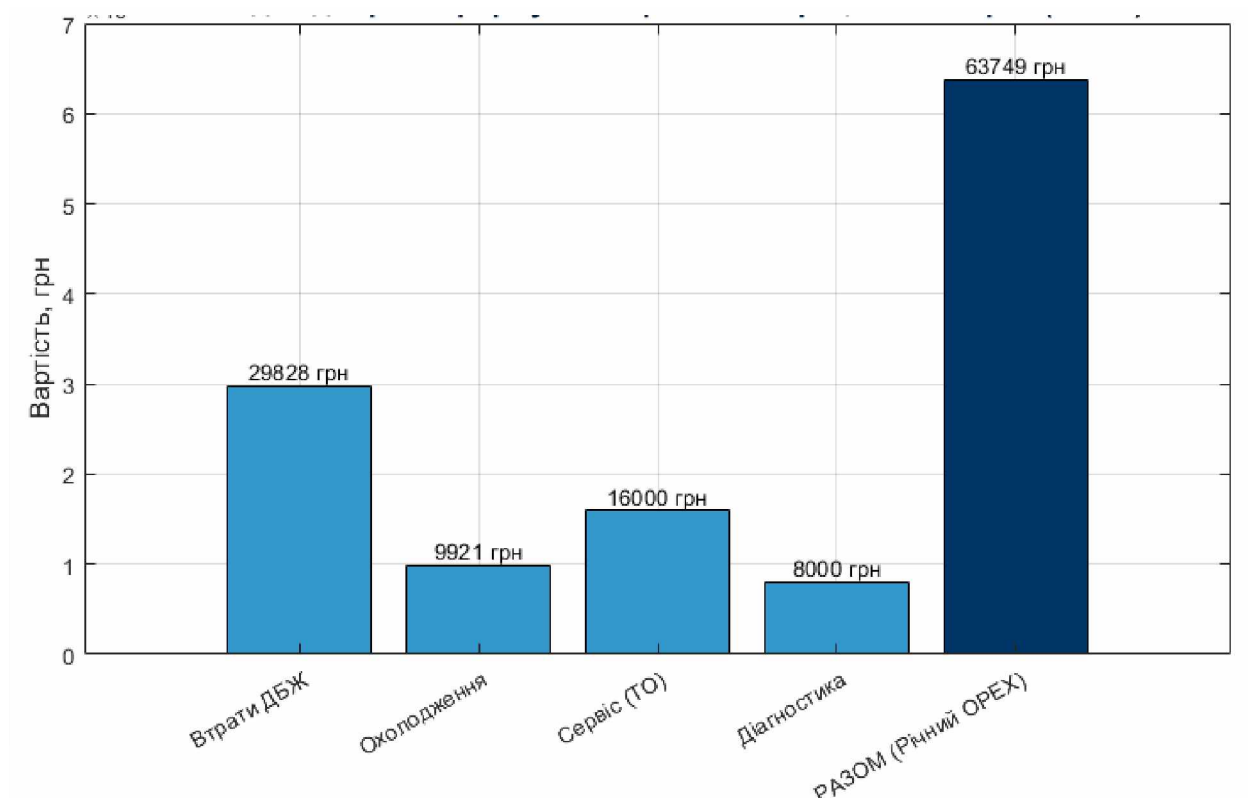


Рисунок 5.4 – Діаграма структури річного ОРЕХ

5.4 Оцінка ефекту від впровадження

Оцінка на прямий комерційний ефект від впровадження систем промислової автоматизації та гарантованого електропостачання КВПіА полягає не стільки в безпосередній економії ресурсів чи капітальних витрат, скільки в запобіганні масштабним техногенним та екологічним аваріям. Специфіка доменного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» як об'єкта підвищеної небезпеки з безперервним технологічним циклом висуває безкомпромісні вимоги до живучості систем керування. Впровадження проектного On-Line ДБЖ Huawei UPS5000-E у комплекті з літій-залізо-фосфатними акумуляторами Huawei SmartLi формує виражений системний ефект, який класифікується за чотирма головними векторами: технологічним, аварійно-захисним, економічним та екологічним.

Технологічний та аварійно-захисний ефекти є визначальними у даному проекті й полягають у повній ліквідації ризику втрати керування доменним агрегатом при глибоких посадках або повному зникненні напруги в цехових

мережах 0,4 кВ. Завдяки нульовому часу перемикання (0 мс) напівпровідникового інвертора на роботу від літєвого масиву, центральний керуючий ПЛК-контролер та сервери SCADA-системи продовжують безперервний збір інформації та контроль параметрів ходу печі, виключаючи збої процесорів та зависання програмного забезпечення. Розрахований час автономії у 45 хвилин гарантує надійне довготривале живлення електропривода запірної арматури безпеки (лінійний кабель марки (N)HXH FE180/E90). Це дозволяє оператору KBPiA у разі повної системної аварії заводу безпечно відсікти подачу газу, повітряного дуття та керувати контурами охолодження фурм, що повністю запобігає прогару подини печі, вибухонебезпечному виходу доменного газу в атмосферу або заклинюванню шихти, ліквідація наслідків якого може тривати тижнями.

Важливим складником є екологічний ефект та безпека праці експлуатаційного персоналу. На відміну від традиційно використовуваних типу VRLA AGM, які при буферному підзаряді в умовах підвищених температур цеху схильні до виділення вибухонебезпечного водню та парів сірчаної кислоти, герметичні LiFePO₄ є повністю газонепроникними та екологічно чистими. Вони не потребують спорудження окремого ізольованого приміщення з агресивною примусовою витяжною вентиляцією, що суттєво покращує умови праці чергових інженерів. Наявність вбудованої інтелектуальної системи балансування SmartLi BMS майже прибирає людський фактор при обслуговуванні. Контур миттєвої температурної відсічки та кнопка аварійного відключення ЕРО повністю виключають ризик термічного розгону та займання щитової.

Оптимальний ефект проекту розраховується через призму теорії надійності та превентивного менеджменту ризиків. Хоча впровадження комплексу потребує значних початкових капітальних інвестицій (CAPEX у розмірі 914 900 грн), термін окупності системи є віртуально миттєвим при виникненні першої ж мережевої аварії. Прямі збитки від одного лише

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аварійного зупину доменної печі через збій автоматики обчислюються мільйонами гривень. Я впевнений, що капіталовкладення в надійну систему On-Line ДБЖ є формою довгострокового технологічного страхування виробничих активів підприємства, де головним результатом є стабільність, передбачуваність та абсолютна безпека металургійного процесу.

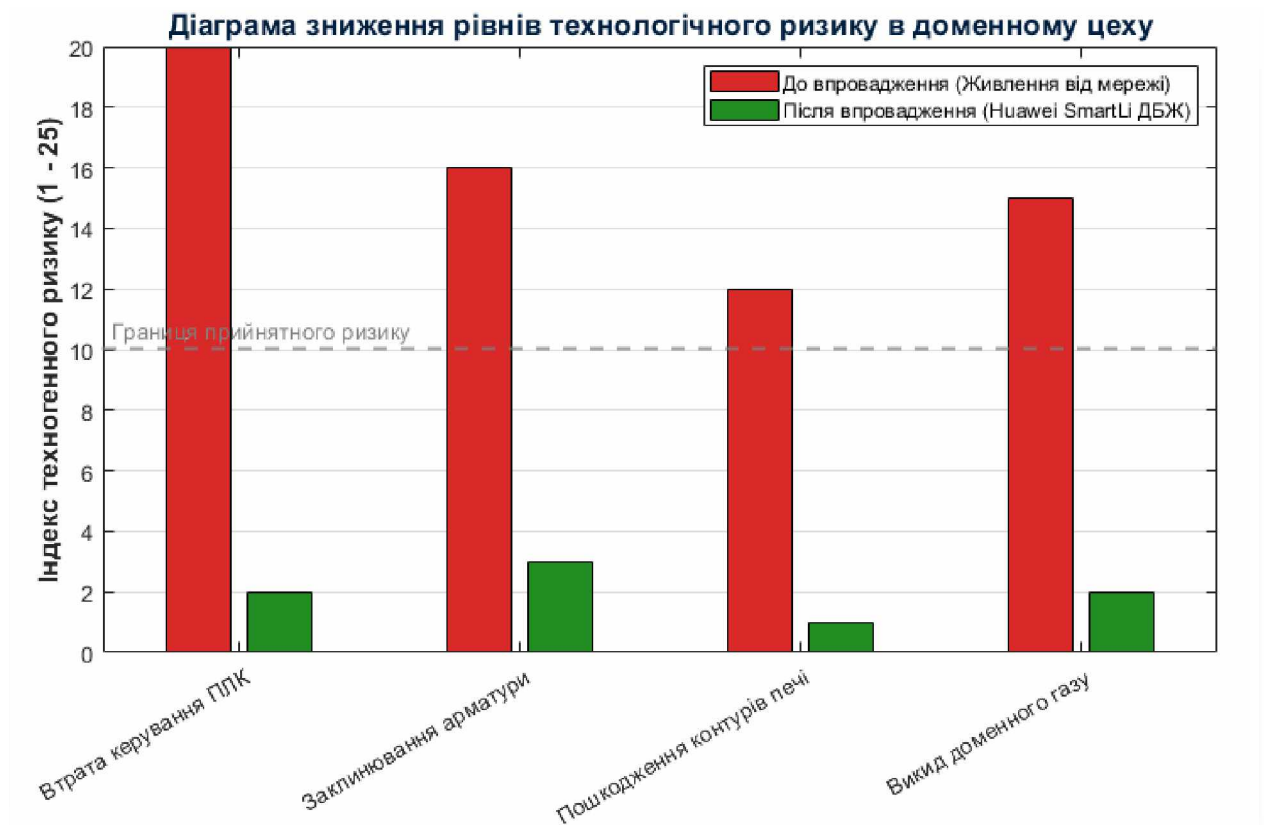


Рисунок 5.5 – Модель оцінки ймовірності та важкості наслідків аварійних ситуацій

5.5 Обмеження проєкту

Розроблені в рамках даної кваліфікаційної роботи інженерно-технічні рішення щодо інтеграції комплексу безперебійного живлення системи КВПіА є завершеним науково-дослідним та концептуальним проєктом. Слід зазначити, що пряме перенесення та практичне впровадження запропонованої схеми на діючому промисловому майданчику мають низку об'єктивних обмежень, характерних для будь-якого академічного проєктування великих промислових об'єктів.

Остаточна реалізація даного інженерного рішення на виробничих потужностях комбінату ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» в обов'язковому порядку потребує залучення ліцензованої проєктно-конструкторської організації для розробки детальної робочої документації (РД) з урахуванням фактичних, уточнених на момент монтажу геометричних, теплових та електричних параметрів цеху.

Подальше промислове розгортання системи накладає жорсткі вимоги щодо узгодження проєктних рішень із суміжними експлуатаційними та наглядовими службами комбінату, а саме:

- *Служба головного енергетика та електропостачання:* для остаточного підтвердження точок підключення в ГРЩ підстанції, верифікації розрахункових струмів короткого замикання, узгодження графіків селективності з головними цеховими захистами та виділення лімітів потужності на заряд АКБ.
- *Служба автоматизації (КВПіА та ІТ):* для верифікації протоколів обміну даними Modbus TCP/SNMP, узгодження адресних просторів та інтеграції мнемосхеми ДБЖ у загальнозаводську структуру SCADA без порушення кібербезпеки мережі.
- *Служби охорони праці та пожежної безпеки:* для детального аудиту схеми розміщення обладнання, перевірки працездатності контуру ЕРО, експертизи вогнестійкості кабельних проходок і відповідності приміщення щитової вимогам категорії вибухопожежонебезпечності.
- *Технологічні та виробничі служби доменного цеху:* для узгодження часових регламентів та розробки детальної програми-методики проведення монтажних і пусконаладжувальних робіт, які повинні виконуватися виключно під час планових технологічних зупинів (капітальних ремонтів) доменної печі, без переривання поточного процесу плавки чавуну.

Виконана робота розглядається як концептуальний проєкт для подальшого детального проєктування системи резервного електроживлення в умовах металургійного підприємства АрселорМіттал Кривий Ріг.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		96

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено комплексне технічне рішення щодо модернізації системи гарантованого електропостачання засобів автоматизації та КВПіА доменної печі ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Запровадження проектного комплексу ДБЖ дозволяє мінімізувати ризики техногенних аварій та забезпечити безперервність технологічного процесу в умовах нестабільності зовнішніх електричних мереж.

Впровадження модульного On-Line ДБЖ потужністю 30 кВА із подвійним перетворенням енергії гарантує нульовий час перемикання на резерв та повну гальванічну ізоляцію ПЛК-контролерів від цехових збурень. Заміна класичних свинцево-кислотних батарей на літій-залізо-фосфатну систему з інтелектуальним керуванням забезпечує 45 хвилин автономії, що є достатнім для надійного живлення автоматики та вогнестійких ліній запірної арматури під час контрольованого аварійного зупину печі. Надійність рішення підкріплена спроектованим щитом критичних навантажень із триступеневим релейним захистом, пристроями захисту від імпульсних перенапруг та контуром миттєвого відключення.

З економічного погляду проект потребує капітальних інвестицій у розмірі 814 900 грн при щорічних експлуатаційних витратах 63 748,50 грн. Моделювання сукупної вартості володіння в MATLAB довело, що за рахунок 15-річного терміну служби літєвих елементів без необхідності їх заміни, система окупається вже на 4-му році експлуатації порівняно зі свинцевими аналогами. Побудована матриця ризиків підтверджує переведення технологічного об'єкта з небезпечної зони у стан прийняттого ризику. Попередження навіть одного аварійного зупину печі повністю компенсує капіталовкладення.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Висновок			Літ.	Арк.	Аркуші
Розробив	Стрілець Р.									
Перевірів	Пересунько								97	99
Н. Контр.	Пересунько									
Затвердж.	Пересунько І.				КНУ гр. ЕЕМ-22-2					

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стандарт вищої освіти України за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», наказ МОН №867 від 20.06.2019.
2. Remus R., Aguado-Monsonet M. A., Roudier S., Sancho L. D. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. European Commission, 2013.
3. ДСТУ EN 62040-3:2015. Системи безперебійного живлення (ДБЖ). Частина 3. Метод зазначення експлуатаційних характеристик та вимог до випробувань (EN 62040-3:2011, IDT). — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. — 84 с.
4. Remus R., Aguado-Monsonet M. A., Roudier S., Sancho L. D. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. European Commission, 2013.
5. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Видання 5-те, перероб. і доп. — Київ : Міненерговугілля України, 2017. — 760 с.
6. ДСТУ Б В.2.5-38:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівельних споруд (IEC 62305:2006, NEQ). — Київ : Мінрегіонбуд України, 2008. — 57 с.
7. Володін В. В. Моделювання систем електропривода та безперебійного живлення в середовищі MATLAB / В. В. Володін. — Київ : Техніка, 2021. — 248 с.
8. Кудрін Б. І. Електропостачання промислових підприємств : підручник для вузів / Б. І. Кудрін. — 3-тє вид. — Москва : Інтернет Інжиніринг, 2019. — 464 с.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-12			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Список використаних джерел	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив		Стрілець Р.						
Перевірів		Пересунько					98	99
						КНУ гр. ЕЕМ-22-2		
Н. Контр.		Пересунько						
Затвердж.		Пересунько І.						

9. Чорний О. П. Асинхронні двигуни в системах промислової автоматизації та електропривода : навч. посібник / О. П. Чорний, А. В. Ножевніков. — Кременчук : КРПУ, 2020. — 192 с.
10. Huawei Digital Power. Huawei UPS5000-E (30-125 kVA) Modular Three-Phase Online UPS : Technical Specification and User Manual. — Shenzhen : Huawei Technologies Co., Ltd., 2024. — 114 p.
11. Huawei Digital Power. SmartLi (Smart Lithium Battery Chamber) Series User Manual. — Shenzhen : Huawei Technologies Co., Ltd., 2025. — 88 p.
12. Schneider Electric. Низьковольтна комутаційна апаратура та системи розподілу Acti9 : Технічний каталог 2024. — Київ : Шнейдер Електрик Україна, 2024. — 312 с.
13. Чернов А. М. Автоматизація та засіб КВПіА доменного виробництва : підручник для металургійних спеціальностей / А. М. Чернов. — Дніпро : Ліра, 2018. — 340 с.
14. Держспоживстандарт України. ДСТУ ІЕС 61508-1:2004. Функційна безпека електричних/електронних/програмованих електронних систем, пов'язаних із безпекою. Частина 1. Загальні вимоги. — Київ : Держспоживстандарт України, 2006. — 62 с.
15. ДСТУ EN 61800-3:2015. Системи силових електричних приводів із регульованою швидкістю. Частина 3. Вимоги до електромагнітної сумісності та специфічні методи випробувань (EN 61800-3:2004, IDT). — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. — 68 с.