

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

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

РОЗРАХУНОК ТА ОБГРУНТУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ МАЛОГО ДАТА-ЦЕНТРА

Виконала: здобувачка вищої освіти групи ЕЕМ-22-2 Маргарита ГОНЧАРОВА

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.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

ГОНЧАРОВОЇ Маргарити Олександрівни
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розрахунок та обґрунтування сонячної електростанції для
забезпечення роботи малого дата-центра

2. Строк подання студентом роботи 10 червня 2026р.

3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи

Мета роботи – виконання техніко-економічного розрахунку та інженерного
обґрунтування гібридної системи електропостачання малого дата-центру на
основі сонячної електростанції та акумуляторного резервування для підвищення
надійності та енергоефективності об'єкта..

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)

1. Обґрунтування актуальності. 2. Розрахунок технічних характеристик
енергоживлення. 3. Вибір оптимальної структури системи. 4. Підбір
обладнання. 5. Повний алгоритм переходу до/від резерву. 6. Оцінка
ефективності.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Графічний матеріал кваліфікаційної роботи буде представлено у вигляді
презентації PowerPoint, що складатиметься з 10 слайдів, на яких наочно
відображено структуру автономного електропостачання дата-центру.

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		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Визначити актуальність проблеми, сформулювати мету та завдання проєкту</i>	<i>12 травня 2026 р.</i>
2	<i>Постановка задачі кваліфікаційної роботи</i>	<i>15 травня 2026 р.</i>
3	<i>Уточнення вихідних даних: місце встановлення, склад навантажень дата-центру, критичні навантаження, час автономії</i>	<i>19 травня 2026 р.</i>
4	<i>Розрахунок потужність СЕС, кількість модулів, стрінги, вибрати інвертор</i>	<i>25 травня 2026 р.</i>
5	<i>Розрахунок АКБ/UPS, режими роботи, сценарії автономності, розробка структурної та однолінійної схеми, DC- та AC-частини</i>	<i>01 червня 2026 р.</i>
6	<i>Розрахунок кабелів, втрати напруги, апарати захисту</i>	<i>04 червня 2026 р.</i>
7	<i>Математичне моделювання режимів роботи гібридної СЕС для живлення дата-центру</i>	<i>07 червня 2026 р.</i>
8	<i>Написання загальних висновків, оформлення списку літератури, додатки</i>	<i>9 червня 2026 р.</i>

Дата видачі завдання 12.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Маргарита ГОНЧАРОВА
(ПІБ)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор ПЕРЕСУНЬКО
(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «розрахунок та обґрунтування сонячної електростанції для забезпечення роботи малого дата-центра»: 70 с., 29 рис., 25 літературних джерел.

Об'єкт дослідження – система електропостачання малого дата-центру.

У першому розділі проаналізовано малий дата-центр як електроприймач особливої групи першої категорії надійності — визначено склад навантажень, розраховано добове і річне споживання та оцінено енергоефективність за показником PUE.

У другому розділі обґрунтовано вибір гібридної конфігурації, оцінено сонячний потенціал регіону через PVGIS і розраховано потужність СЕС — 3 МВт. Підібрано фотоелектричні модулі, інвертори і визначено необхідну ємність BESS — 8 МВт·год.

У третьому розділі розроблено структурну і принципову однолінійну схеми гібридної СЕС. Розраховано перерізи кабелів постійного і змінного струму, підібрано апарати захисту і описано логіку перемикань в нормальних та аварійних режимах.

У четвертому розділі виконано математичне моделювання в MATLAB Live Script — досліджено баланс потужності і роботу алгоритмів EMS в нормальних добових циклах і при зникненні мережі. Проведено економічний аналіз окупності за трьома тарифними сценаріями РДН.

ДАТА-ЦЕНТР, ГІБРИДНА СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, СИСТЕМА НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ, BESS, БЕЗПЕРЕБІЙНЕ ЖИВЛЕННЯ, MATLAB, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Гончарова М.О.			Реферат		Літ.	Арк.
Перевірів		Пересулько І.І.						Акрушіє
							5	1
Н. Контр.		Пересулько І.І.					КНУ гр. ЕЕМ-22-2	
Затвердж.		Пересулько І.І.						

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. Аналіз об'єкту електропостачання та визначення електричних навантажень дата-центра	9
1.1. Характеристика малого дата-центру як електроприймача.....	9
1.2. Визначення складу та розрахунок електричних навантажень	12
1.3. Розрахунок добового та річного споживання електроенергії.....	14
1.4. Вимоги до надійності електропостачання дата-центру	16
РОЗДІЛ 2. Розрахунок потужності сонячної електростанції та вибір основного обладнання	20
2.1. Оцінка сонячного потенціалу місця встановлення за даними PVGIS.....	20
2.2. Порівняльний аналіз варіантів конфігурації систем	22
2.3. Розрахунок необхідної встановленої потужності фотоелектричної системи	28
2.4. Вибір типу та розрахунок кількості фотоелектричних модулів.....	32
2.5. Проектування та розрахунок параметрів стрінгів PV-модулів.....	35
2.6. Вибір інверторного обладнання та перевірка характеристик.....	37
2.7. Розрахунок системи накопичення енергії (АКБ/UPS) для автономної роботи	40

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зміст			
Розробив		Гончарова М.О.						
Перевірів		Пересулько І.І.						
Н. Контр.		Пересулько І.І.						
Затвердж.		Пересулько І.І.			Літ. Арк. Акрушіє 6 2 КНУ гр. ЕЕМ-22-2			

РОЗДІЛ 3. Розробка електричної схеми підключення, вибір кабелів і захистів	43
3.1. Побудова структурної схеми системи електропостачання	43
3.2. Розробка однолінійної схеми електричних з'єднань	44
3.3. Розрахунок та вибір перерізу кабельних ліній DC та AC контурів.....	46
3.4. Вибір апаратів захисту та комутаційного обладнання.....	47
3.5. Опис режимів роботи системи в нормальних та аварійних умовах.....	49
РОЗДІЛ 4. Математичне моделювання режимів роботи гібридної СЕС для живлення дата-центру	52
4.1. Модель навантаження дата-центру	52
4.2. Модель генерації сонячної електростанції	54
4.3. Баланс активної потужності	55
4.4. Модель стану заряду BESS	55
4.5. Алгоритм EMS	59
4.6. Економічна модель	62
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68

ВСТУП

Малі дата-центри — це специфічні споживачі, де будь-яке переривання живлення одразу б'є по технологічному циклу. Впровадження СЕС в таких об'єктах дає одразу кілька ефектів: менше тягнеш з централізованої мережі, вища загальна енергоефективність і частковий резерв для критичних навантажень. Саме тому розрахунок і обґрунтування параметрів сонячної станції для малого дата-центру — задача і технічно, і економічно актуальна.

Мета роботи — виконати інженерний розрахунок і обґрунтувати параметри СЕС для надійної та енергоефективної роботи малого дата-центру. Предмет дослідження охоплює параметри СЕС, інверторів, АКБ і UPS, характеристики кабельних ліній, апарати захисту та режими роботи системи.

Для досягнення цієї мети вирішуються такі завдання: розрахунок встановленої і розрахункової потужності, добового і річного споживання; оцінка енергоефективності за показником PUE; визначення необхідної потужності СЕС з урахуванням сонячного потенціалу регіону; вибір фотоелектричних модулів та інверторного обладнання; розрахунок ємності АКБ/UPS для резервування критичних навантажень; розробка структурної та однолінійної схем підключення; розрахунок кабельних ліній і вибір апаратів захисту; техніко-економічне обґрунтування і порівняння варіантів реалізації.

Практичне значення роботи — комплексне інженерне рішення, яке визначає потужність системи, спосіб підключення і захисту, а також забезпечує стабільний резерв автономності для малого дата-центру в умовах нестабільного зовнішнього енергопостачання.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Вступ		Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив		Гончарова М.О.						8	1
Перевірів		Пересунько І.І.							
Н. Контр.		Пересунько І.І.					КНУ гр. ЕЕМ-22-2		
Затвердж.		Пересунько І.І.							

РОЗДІЛ 1. Аналіз об'єкту електропостачання та визначення електричних навантажень дата-центра

1.1. Характеристика малого дата-центру як електроприймача

Дата-центри давно перестали бути просто кімнатами з серверами. Банки, заводи, держустанови — всі так чи інакше тримаються на їхній безперервній роботі, бо саме тут осідають, обробляються і рухаються далі величезні масиви даних.

І от що цікаво — навіть невеликий об'єкт такого типу автоматично потрапляє до першої категорії електроприймачів. Це не просто бюрократична позначка. Це означає, що будь-яке, навіть коротке знеструмлення — це вже втрата даних і прямі фінансові збитки.

Якщо дивитись на ЦОД з інженерної сторони — це досить складна споруда, де в одному місці зібрано сервери, накопичувачі і телекомунікаційну інфраструктуру. Головна задача всього цього господарства — працювати без зупинок, з жорсткими вимогами до доступності, захисту інформації та енергоефективності. [1]

Електротехнічний аналіз груп навантаження:

- Сервери, мережеве обладнання, системи зберігання даних

Майже все сучасне обладнання живиться через імпульсні блоки живлення — SMPS. Їхня задача проста: взяти змінний струм із мережі і перетворити на постійний низьковольтний. Але от з точки зору електротехніки — це вже нелінійне навантаження. Струм тут не тече рівномірно, він іде короткими сплесками саме в моменти, коли напруга досягає свого піку.

Наслідок цього цілком конкретний — форма хвилі струму і напруги в локальній мережі 0,4 кВ починає спотворюватись.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розробив		Гончарова М.О.			Розділ 1				Літ.	Арк.	Акрушів		
Перевірів		Пересунько І.І.									9	11	
									КНУ гр. ЕЕМ-22-2				
Н. Контр.		Пересунько І.І.											
Затвердж.		Пересунько І.І.											

Ті самі імпульсні сплески породжують вищі гармоніки — і найчастіше це 3-тя, 5-та і 7-ма. З усіх них найбільше клопоту дає саме 3-тя. Річ у тому, що вона не компенсується між фазами, а навпаки — накопичується в нейтральному провіднику. І це вже серйозно: провідник починає грітись навіть тоді, коли навантаження по фазах цілком рівномірне.

Щоб захистити від цього мережу і сонячні інвертори, АВВ рекомендує ставити ДБЖ з низьким коефіцієнтом гармонічних спотворень на вході.

Охолодження та вентиляція

Сервери виділяють багато тепла — і це тепло треба кудись дівати. Для цього в дата-центрах стоять прецизійні кондиціонери, промислові чилери і вентиляційні установки. Все це працює цілодобово без зупинок, утримуючи температуру в жорстких межах. Саме тому за споживанням електроенергії ця група іде одразу після серверів. [3]

Якщо дивитись на чилери і кондиціонери з боку електромережі — в їх основі компресори і вентилятори, а це типове індуктивне навантаження. Воно має низький коефіцієнт потужності і постійно тягне з мережі реактивну енергію — без неї магнітні поля в двигунах просто не утворюються.

Розрахунок споживаної повної потужності ($S_{\text{охл}}$) для таких систем визначається за формулою:
$$S_{\text{охл}} = \frac{P_{\text{охл}}}{\cos \varphi} = \sqrt{(P_{\text{охл}}^2 + Q_{\text{охл}}^2)}$$

де $P_{\text{охл}}$ -активна потужність компресорів, кВт; $Q_{\text{охл}}$ — реактивна потужність, кВАр.

Найбільш проблемний момент для мережі — це коли компресор вмикається. При прямому пуску струм підскакує в 5–7 разів вище номіналу. Для малого дата-центру це виливається в різку короточасну просадку напруги — і інвертори сонячної станції мають це пережити, не відключившись по захисту. [4]

Щоб якось з цим боротись, все частіше ставлять частотно-регульовані приводи. Вони пом'якшують пуск і заодно покращують PUE. Але тут є зворотній

бiк — самi приводи створюють нелiнiйне навантаження i гонять у мережу високочастотнi гармонiчнi збурення.

Системи перетворення енергiї ДБЖ (UPS)

Для таких об'єктiв як малий дата-центр беруть ДБЖ класу VFI — Voltage and Frequency Independent. [4] Працює це так: вхiдний змiнний струм спочатку випрямляється в постiйний, а потiм знову перетворюється — але вже в чисту синусоїду. Виходить свого роду електрична стiна мiж IT-обладнанням i тим що твориться у зовнiшнiй мережi 0,4 кВ. Жодне збурення звiдти просто не проходить далi.

Повна потужнiсть системи ДБЖ S_{ups} обирається з урахуванням коефiцiєнта корисної дiї η та коефiцiєнта потужностi навантаження:

$$S_{ups} = \frac{P_{\text{крит}}}{\eta \cdot \cos \varphi}$$

Подвiйне перетворення — це не безкоштовно. Частина енергiї завжди iде на тепло, i ККД сучасних ДБЖ у цьому режимi тримається в межах 94–97%. Цi втрати постiйнi, i їх обов'язково треба закладати в загальний енергетичний баланс СЕС.

Є ще один нюанс — якщо завантаження падає нижче 25–30%, ККД починає суттєво просiдати. Для малого дата-центру це актуально в години низької обчислювальної активностi: питомi втрати на власнi потреби системи живлення в такi моменти зростають. [4]

При цьому сам ДБЖ є центральним вузлом гiбридної системи. Постiйний струм вiд сонячних панелей заходить прямо в DC-шину — i це не випадково. Менше етапiв перетворення означає менше втрат i вищий загальний ККД системи.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248С-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Пiдпис	Дата		11

- Моніторинг, освітлення, безпека

За методологією The Green Grid всі допоміжні системи — це накладні витрати, які тягнуть PUE вгору. Кожен окремий пристрій споживає небагато, але коли все це крутиться цілодобово — набігає відчутна частка загального енергоспоживання.

Система моніторингу — це датчики, контролери і шлюзи, які постійно збирають дані про струми, напруги і температури. Електротехнічно — малопотужне активне навантаження, якому потрібне стабілізоване живлення постійним струмом. Проблема в тому, що імпульсні завади від пусків кондиціонерів можуть давати похибки в показниках. Тому ці споживачі обов'язково вішають на виділені лінії ДБЖ.

Системи безпеки і пожежна автоматика — тут пріоритет надійності найвищий. Датчики диму, модулі газового гасіння, контроль доступу — все це живиться від блоків 24 В з власним акумулятором. В режимі очікування споживання копійчане, але як тільки спрацьовує тривога — система має витримати пускові струми клапанів і сповіщувачів, а це вже зовсім інші цифри.

Освітлення на LED забирає менше 1% від загального балансу — майже нічого. Але LED-драйвери при цьому генерують високочастотні гармоніки низької амплітуди, і це свій внесок у нелінійність навантаження об'єкта все одно дає.

1.2. Визначення складу та розрахунок електричних навантажень

Щоб правильно підібрати потужність СЕС і розрахувати ємність акумуляторів — спочатку треба розібратись скільки взагалі споживає об'єкт. Для цього використовують метод коефіцієнта використання. Розрахункова потужність — і для кожної групи окремо, і для об'єкта загалом — визначається за формулою: [5]

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{\text{розр}} = \Sigma(P_i \cdot k_{\text{вик}})$$

Вихідними даними для нашого розрахунку є периферійний малий дата-центр (типу EdgeConneX) із загальною цільовою розрахунковою потужністю близько 3 МВт. Нижче в таблиці 1.1 наведено детальний розподіл навантажень по групах.

Група навантаження	Одиниця	Кількість	Потужність одиниці, кВт	квик	Ррозр, кВт
Сервери	шт.	100	15	0,95	1425
Комутатори, маршрутизатори	шт.	60	5	0,90	270
Системи зберігання даних	шт.	25	14	0,90	315
Кондиціонери охолодження	шт.	5	200	0,75	750
UPS і допоміжні пристрої	шт.	6	33,5	0,85	170,8
Освітлення та сервісні споживачі	група	1	100	0,60	60

Таблиця 1.1 — Розрахунок електричних навантажень малого дата-центру

У підсумку сумарна розрахункова потужність об'єкта вийшла 2990 кВт — і це цілком вписується в заявлені характеристики малого дата-центру EdgeConneX.



Рисунок 1.1 — Структура розподілу розрахункової потужності дата-центру

Найбільшу частку енергоспоживання формує IT-інфраструктура — 2010 кВт. Це обладнання не можна вимкнути навіть на хвилину. Далі йде система прецизійного охолодження — 750 кВт. І ще 170 кВт тягнуть на себе власні потреби ДБЖ: струми витоку, живлення плат керування інверторами і охолодження самих акумуляторів.

1.3. Розрахунок добового та річного споживання електроенергії

Сервери, накопичувачі і комутатори не зупиняються ніколи — відповідно і охолодження з безперебійним живленням теж працює без перерв. Знаючи що сумарна розрахункова потужність об'єкта складає 2990,8 кВт, можна переходити до розрахунку — скільки з цього покрити СЕС, а скільки доведеться брати із зовнішньої мережі.

Добове споживання електроенергії знаходимо за формулою:

$$E_{\text{доб}} = P_{\text{розр}} \cdot 24$$

$$E_{\text{доб}} = 2990,8 \cdot 24 = 71779,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Визначення річної потреби електроенергії

$$E_{\text{рік}} = E_{\text{доб}} \cdot 365$$

$$E_{\text{рік}} = 71779,2 \cdot 365 = 26\,199\,408 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

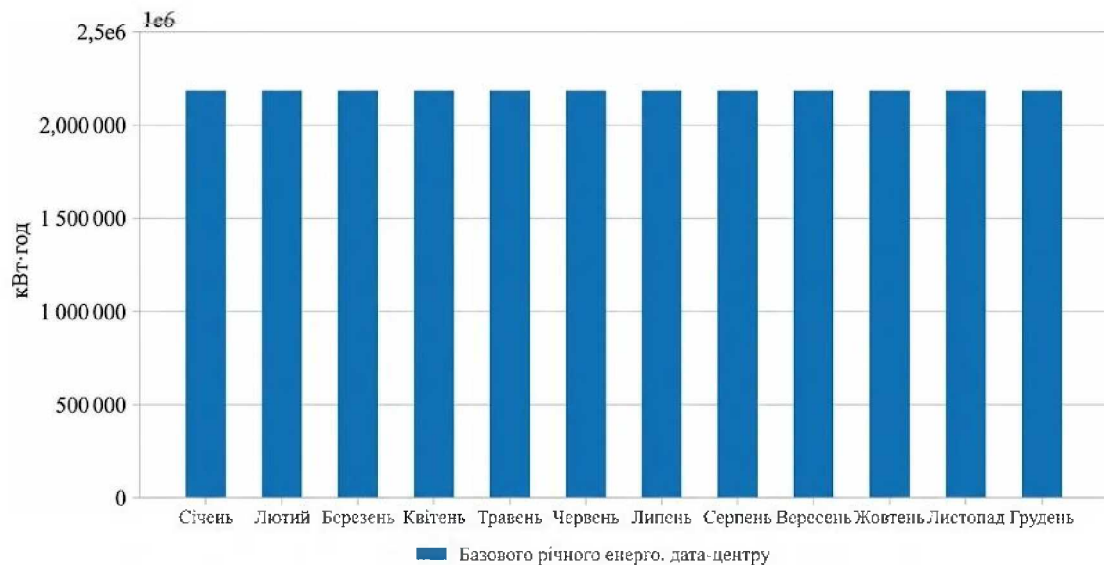


Рисунок 1.2 — Прогнозний графік базового річного енергоспоживання дата-центру по місяцях.

Розрахункове річне споживання 26,2 ГВт·год на рік — це серйозне навантаження і на місцеву підстанцію, і на розподільні мережі. До того ж якщо весь цей обсяг тягнути виключно з традиційної енергосистеми — вуглецевий слід виходить відчутний.

Рівномірний графік ІТ-навантаження в поєднанні з такою енергоємністю — це якраз той випадок, коли будівництво власної гібридної системи електропостачання економічно виправдане. Сонячна генерація розвантажить зовнішню мережу в денні години і дасть хоч якусь незалежність на випадок відключень чи аварій.

Щоб оцінити наскільки ефективно влаштована інфраструктура дата-центру, The Green Grid використовує коефіцієнт PUE — Power Usage Effectiveness. [6] Він показує просту річ: яка частка електроенергії йде

безпосередньо на ІТ-обладнання, а яка — на все інше: охолодження, ДБЖ, освітлення.

Визначаємо оцінку енергетичної ефективності:

$$P_{\text{заг}} = P_{\text{ІТ}} \cdot PUE$$

Виходячи з розрахунків у Таблиці 1.1, сумарна потужність обчислювального обладнання становить:

$$P_{\text{ІТ}} = 1425 \text{ (сервера)} + 270 \text{ (комутатори)} + 315 \text{ (СЗД)} = 2010 \text{ кВт}$$

Тепер можемо вивести фактичний коефіцієнт PUE нашого дата-центру:

$$PUE = P_{\text{заг}} / P_{\text{ІТ}}$$

$$PUE = 2990,8 / 2010,0 \approx 1,49$$

Отримали показник $PUE \approx 1,49$ це означає, що на кожен кіловат корисної ІТ-потужності витрачається 0,49 кВт енергії на підтримку інфраструктури (охолодження, ДБЖ, освітлення). [6]

1.4. Вимоги до надійності електропостачання дата-центру

І ПУЕ, і міжнародний стандарт ТІА-942 однозначні в цьому питанні — малий дата-центр це об'єкт підвищеної відповідальності. Вимкнули світло — зупинились обчислення, полетіли дані, і одразу рахуй фінансові збитки. Тому з електротехнічної точки зору такий об'єкт відноситься до особливої групи першої категорії надійності. [7]

Але жити все 2990,8 кВт від акумуляторів — це і технічно складно, і економічно безглуздо. Тому навантаження треба розбити на пріоритетні групи і вже під кожен з них підбирати відповідне резервування.

1. Класифікація електроприймачів за ступенем критичності

Перша група — абсолютна безперебійність. Сюди входять сервери, комутатори, системи зберігання даних, диспетчеризація і пожежна автоматика. Загалом це близько 2010 кВт, і тут навіть миттєве моргання неприпустиме.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Живлення йде виключно через ДБЖ з подвійним перетворенням — на виході завжди чиста синусоїда, що б не відбувалось у зовнішній мережі.

Друга група — гарантоване живлення. Прецизійні кондиціонери, чилери, примусова вентиляція. Ці системи на відміну від першої групи можуть пережити коротку паузу — кілька секунд, максимум хвилину. Цього якраз вистачає щоб спрацював АВР або інвертори з дизелем вийшли на робочий режим.

Сервери якийсь час витримують без активного охолодження — теплова інерція дає цей запас. Але коли кліматика повертається після паузи, вмикати все одразу не можна — пускові струми підскачуть і можуть перевантажити інвертори або локальну мережу. Тому запуск іде поетапно.

Третя група — неперіоритетна. Загальне і чергове освітлення, сервісні розетки, побутові споживачі. Як тільки система переходить в аварійний або автономний режим — ця група просто відрізається. Весь резерв акумуляторів іде на те, що справді важливо — на ІТ-ядро.

2. Технічні вимоги до систем безперебійного живлення (ДБЖ)

Для об'єктів класу дата-центр комплекс ДБЖ виконує не лише функцію резервного джерела, а й слугує активним буфером між нестабільною зовнішньою мережею та чутливим мікропроцесорним обладнанням.

До ДБЖ висувається кілька конкретних електротехнічних вимог.

- Резервування будується на модульному принципі — якщо один силовий блок відмовляє, навантаження миттєво перекидається на інші модулі і живлення не переривається.

- По перевантаженню — інверторна частина має спокійно тримати тривалі сплески потужності. Без цього не відпрацюєш нормально ні коротке замикання на відхідній лінії, ні комутаційні перехідні процеси.

- І ще один важливий момент — робота з нелінійними споживачами. Імпульсні блоки живлення серверів добряче спотворюють струм, але вихідна напруга ДБЖ попри це має залишатись чистою синусоїдою. Коефіцієнт нелінійних спотворень — не більше 1–2%.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

3. Функціонал систем накопичення енергії в інфраструктурі СЕС

У класичній схемі акумулятори розраховані на одне — протримати ІТ-навантаження 10–15 хвилин поки запуститься дизельний генератор. Але як тільки в схему заходить сонячна генерація і будується гібридна мікромережа — роль АКБ кардинально змінюється.

Тепер це вже не просто аварійний буфер, а повноцінна система накопичення енергії з набором конкретних задач:

1. Диспетчеризація генерації — вдень, коли сонячні панелі видають більше ніж потрібно, надлишок не викидається, а осідає в батареях.
2. Згладжування графіка навантаження — кліматичне і прецизійне обладнання час від часу дає різкі сплески споживання. АКБ це компенсує і не дає просадок у мережі.
3. Автономізація об'єкта — вночі або коли сонця немає, накопичений ресурс іде в роботу і скорочує обсяги що доводиться тягнути з комерційної мережі 10/0,4 кВ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок до розділу 1

У першому розділі виконано електротехнічний аналіз малого дата-центру як електроприймача особливої групи першої категорії надійності. На основі дослідження режимів роботи визначено ключові енергетичні параметри об'єкта, які формують вихідну базу для проектування системи електропостачання з інтеграцією СЕС:

- сумарна розрахункова потужність $P_{\text{розр}} = 2990,8$ кВт, що включає корисну потужність ІТ-обладнання, технологічні втрати в ДБЖ та енергоспоживання систем охолодження
- критична потужність $P_{\text{крит}} = 2010,0$ кВт — навантаження групи абсолютної безперебійності, що потребує живлення з нульовим часом перемикання;
- добове споживання електроенергії $E_{\text{доб}} = 71\,779,2$ кВт·год.
- річний обсяг енергоспоживання $E_{\text{рік}} = 26,2$ ГВт·год.
- коефіцієнт енергоефективності $PUE = 1,49$, що відповідає чинним міжнародним стандартам і свідчить, що інженерна інфраструктура ЦОД потребує додаткових 49% енергії відносно корисного ІТ-навантаження;
- мінімальний час автономної роботи від акумуляторів для критичної групи споживачів становить 15 хвилин — інтервал, достатній для виходу резервних джерел на робочий режим;
- живлення критичного навантаження передбачено виключно через модульні ДБЖ подвійного перетворення з апаратним резервуванням.

Отримані розрахункові параметри підтверджують технічну доцільність та економічну обґрунтованість інтеграції відновлюваних джерел енергії, а також формують інженерний базис для вибору конфігурації СЕС і оптимізації параметрів системи накопичення енергії в наступному розділі роботи.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248С-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

РОЗДІЛ 2. Розрахунок потужності сонячної електростанції та вибір основного обладнання.

2.1. Оцінка сонячного потенціалу місця встановлення за даними PVGIS

Перш ніж проектувати СЕС — треба розібратись з двома речами: що відбувається з сонцем у цьому регіоні і де фізично розмістити все обладнання.

- Географічне та інфраструктурне обґрунтування:

З локацією все досить зрозуміло — Дніпропетровська область, центрально-східний промисловий регіон. Середньорічна інсоляція тут 1320–1350 кВт·год/м², що для України дуже непогано. До того ж регіон має розвинену електромережеву інфраструктуру — а це важливо для забезпечення категорійності живлення. [9]

Просторове рішення та компонування:

При потужності 3000 кВт під панелі з урахуванням технологічних проходів потрібно 5–5,5 га. На даху таке просто не розмістиш — масштаб не той. Єдине розумне рішення — наземна СЕС на прилеглій території, і це якраз дозволяє підключити генерацію прямо в локальну систему електропостачання.

Чим ближче інверторне обладнання до головного розподільного щита — тим коротші кабельні лінії 0,4 кВ, менші втрати напруги і потужності, і надійніше перемикання на накопичувачі коли щось іде не так у зовнішній мережі.

Моделювання генерації в системі PVGIS:

Сонячний потенціал і помісячний виробіток рахували через європейську геоінформаційну систему PVGIS. В якості базової моделі взяли мережеву СЕС на 3 МВт, панелі дивляться строго на південь — азимут 0°.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Гончарова М.О.			Розділ 2		Літ.	Арк.
Перевірів		Пересунько І.І.						Акрушіє
								20
Н. Контр.		Пересунько І.І.					КНУ	
Затвердж.		Пересунько І.І.						
							гр. ЕЕМ-22-2	

Кут нахилу конструкцій — 35°, це оптимум для даної широти: і річний виробіток максимальний, і взимку коли сонце низько міжрядне затінення мінімальне.

Результати помісячної генерації і порівняння з графіком споживання дата-центру зведені в таблиці 2.1.

Місяць	Сонячна радіація	Виробіток СЕС	Споживання дата-центру	Покриття
Січень	45 кВт·год/м²	108 000 кВт·год	2 225 155 кВт·год	4,9 %
Лютий	65 кВт·год/м²	156 000 кВт·год	2 009 818 кВт·год	7,8 %
Березень	110 кВт·год/м²	264 000 кВт·год	2 225 155 кВт·год	11,9 %
Квітень	145 кВт·год/м²	348 000 кВт·год	2 153 376 кВт·год	16,2 %
Травень	185 кВт·год/м²	444 000 кВт·год	2 225 155 кВт·год	20 %
Червень	195 кВт·год/м²	468 000 кВт·год	2 153 376 кВт·год	21,7 %
Липень	205 кВт·год/м²	492 000 кВт·год	2 225 155 кВт·год	22,1 %
Серпень	180 кВт·год/м²	432 000 кВт·год	2 225 155 кВт·год	19,4 %
Вересень	135 кВт·год/м²	324 000 кВт·год	2 153 376 кВт·год	15,1 %
Жовтень	90 кВт·год/м²	216 000 кВт·год	2 225 155 кВт·год	9,7 %
Листопад	50 кВт·год/м²	120 000 кВт·год	2 153 376 кВт·год	5,6 %
Грудень	35 кВт·год/м²	84 000 кВт·год	2 225 155 кВт·год	3,8 %
Разом за рік	1440 кВт·год/м²	3 456 000 кВт·год	26 199 408 кВт·год	13,2 %

Таблиця 2.1 — Місячна генерація СЕС та покриття споживання дата-центру

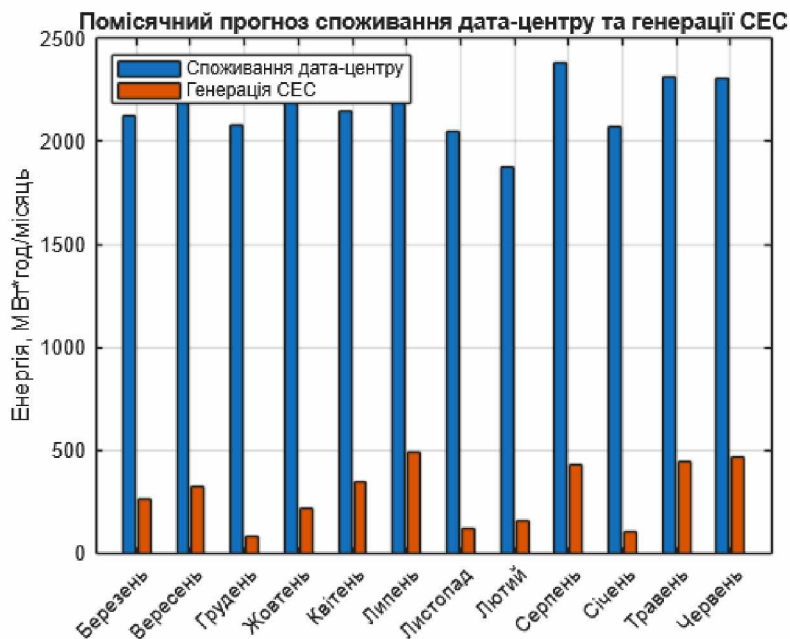


Рисунок 2.1 — Графік місячної генерації СЕС і споживання дата-центру

СЕС на 3 МВт при такій енергоемності об'єкта закриває близько 13,2% річного споживання — і це з урахуванням того що дата-центр працює цілодобово без вихідних. Сезонна картина при цьому нерівномірна: взимку виробіток падає до мінімуму, зате в червні-липні станція дає вже понад 20% від навантаження об'єкта.

З електротехнічної точки зору тут є приємний збіг — саме влітку, коли сонячна генерація на піку, системи охолодження дата-центру теж працюють на максимумі через спеку. Тобто найбільше виробляємо якраз тоді, коли найбільше потрібно.

2.2. Порівняльний аналіз варіантів конфігурації систем

Спроектувати систему електропостачання для дата-центру — це не просто підібрати обладнання. Треба одночасно витиснути максимум з відновлюваних джерел і при цьому ні на крок не відступити від нормативів надійності. Дата-центри — це критична інфраструктура, і будь-яке переривання живлення одразу б'є і по грошах, і по репутації.

Підключити сонячну станцію до схеми електропостачання ЦОД можна трьома способами — три різні топології з різними характеристиками. Щоб вибрати оптимальну, розберемо кожну з них з електротехнічної точки зору, спираючись на чинні нормативи і технічну літературу. [14, 25]

1. Мережева фотоелектрична система (On-Grid) без пристроїв накопичення енергії

Схема On-Grid працює просто — інвертори синхронізуються із зовнішньою трифазною мережею 0,4 кВ і віддають у неї те що виробляють панелі. Акумуляторів тут немає взагалі, і саме це дає найвищий ККД і найменші капітальні витрати серед усіх трьох варіантів. [14, 25]

Переваги очевидні: мінімум грошей на закупівлю і пусконаладження, схема комутації проста. Вдень коли сонце є — генерація йде прямо в локальну мережу об'єкта і знижує скільки треба брати із зовнішньої мережі. Операційні витрати падають.

Але є один принциповий мінус — резервування тут нульове. За вимогами безпеки інвертори обов'язково вимикаються як тільки зовнішня мережа пропадає або починає "гуляти" по параметрах. Тобто саме тоді коли світло відключили — сонячна станція теж зупиняється. Про автономний режим навіть мови не йде.

2. Автономна СЕС (Off-Grid) з масивом АКБ

Off-Grid — це повна ізоляція від зовнішньої енергосистеми. Все що споживає об'єкт — береться тільки з панелей і акумуляторів. Звучить незалежно, але є нюанс: щоб тягнути 3 МВт цілодобово взимку коли сонця майже немає — потрібен акумуляторний масив на десятки мегават-годин. Це колосальні гроші.

Єдина перевага — абсолютна енергонезалежність. Але на практиці для дата-центру це не працює. Взимку виробіток сонячної енергії падає до 3–5% від літнього рівня — і без дизельних генераторів величезної потужності просто не обійтись. Тобто "незалежність" виходить дуже умовна і дуже дорога.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248С-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

3. Гібридна структура з мережею та АКБ / ДБЖ

Гібридна схема — це середина між двома попередніми варіантами. Об'єкт працює паралельно із зовнішньою мережею, але при цьому має буферні накопичувачі для автономного режиму. Якщо мережа просідає або зникає зовсім — живлення не переривається, система переходить на акумулятори.

Алгоритми перерозподілу потоків потужності, оптимізація ємності накопичувачів і особливості керування для об'єктів з високими вимогами до надійності — все це розглядається далі.

Головна перевага гібриду — він і економить, і страхує одночасно. Вдень панелі розвантажують зовнішню мережу і покривають споживання охолодження. Якщо щось трапляється з мережею — система без затримки перекидається на акумулятори і критичні ІТ-групи продовжують працювати.

Мінуси теж є. Схема керування потоками потужності складніша, гібридні інвертори дорожчі, і релейний захист треба розробляти серйозніший. [2, 13]

Критерій порівняння	Мережева СЕС без АКБ	Автономна СЕС з АКБ	Гібридна СЕС + мережа + АКБ/UPS
Капітальні витрати	Мінімальні	Високі	Середні
Забезпечення I категорії надійності	Немає (0% захисту при аварії мережі)	Є (за умови надлишковості системи)	Є (100% захисту критичних груп)
Економічна ефективність	Висока	Низька	Максимальна
Складність системи керування та РЗА	Низька	Середня	Висока
Залежність від сезонних коливань	Висока	Критична (дефіцит взимку)	Низька
Рекомендація до впровадження	Не рекомендується	Не рекомендується	Рекомендується

Таблиця 2.2 — Порівняльний аналіз варіантів побудови системи електропостачання дата-центру

Обґрунтування обраної архітектури:

Після порівняння всіх трьох варіантів вибір впав на гібридну конфігурацію: мережа 0,4 кВ + СЕС + UPS/АКБ + критичне навантаження. [2, 14] Вдень СЕС паралельно працює з мережею і знижує скільки треба з неї брати. А якщо мережа падає — акумуляторний резерв забезпечує нульовий час переривання для обчислювального обладнання з навантаженням $P_{\text{крит}} = 2010,0$ кВт.

Для деталізації обраного технічного рішення розроблено структурну схему розподілу потоків потужності в рамках проєктуємої гібридної системи електропостачання малого дата-центру (рис. 2.2).

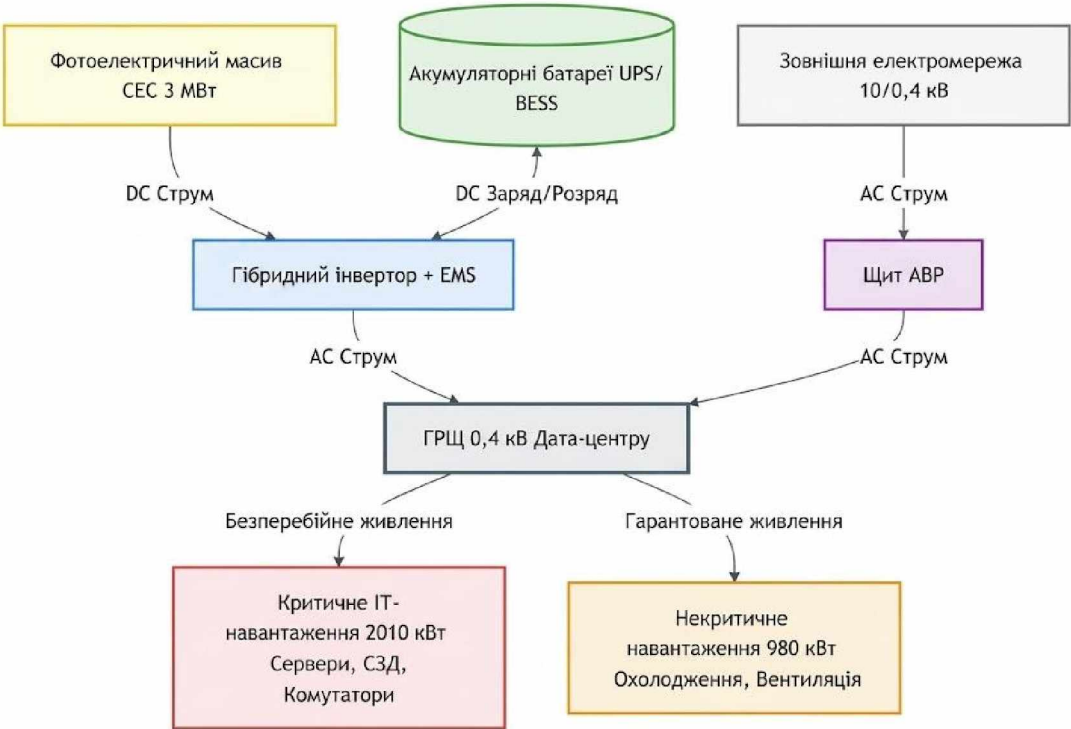


Рисунок 2.2 — Концептуальна структурна схема гібридної системи електропостачання дата-центру

Ключова особливість цієї схеми — вбудована система керування EMS. Вона працює в реальному часі і постійно перерозподіляє потоки потужності залежно від того що відбувається з погодою і як себе поводить зовнішня мережа. [13, 23] Щоб краще зрозуміти як все це працює протягом доби — на рисунку 2.3 наведено графік добового балансу потужності.

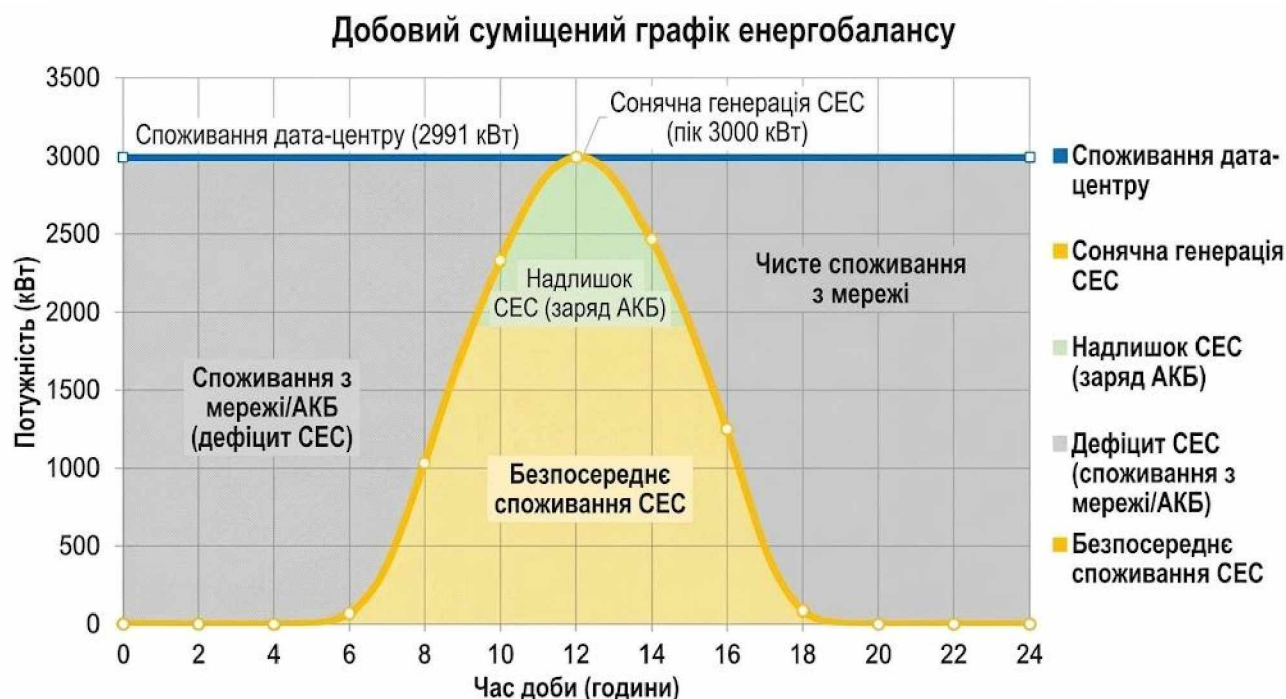


Рисунок 2.3 — Добовий графік генерації СЕС та споживання електроенергії дата-центром

Дивлячись на добовий графік — одразу видно два різні режими роботи: вдень коли сонце є і генерація покриває потреби об'єкта, і вночі коли все навантаження лягає на зовнішню мережу. Миттєвий баланс активної потужності в будь-який момент часу t описується рівнянням: [25]

$$P_{\text{ЦОД}}(t) = P_{\text{СЕС}}(t) + P_{\text{мережі}}(t) \pm P_{\text{АКБ}}(t)$$

Якщо детально розібрати добовий графік — можна виділити три чітко різних режими роботи гібридної системи протягом доби [14, 25]:

Чисто нічний режим (t [00:00 - 05:00] та t [21:00 - 24:00]) у нічні години сонячна інсоляція відсутня, а акумулятори перебуває в режимі очікування або оптимізаційного нічного до заряду. Рівняння балансу набуває вигляду:

$$P_{\text{СЕС}}(t) = 0; \quad P_{\text{АКБ}}(t) = 0 \implies P_{\text{мережі}}(t) = P_{\text{ЦОД}} = 2990,8 \text{ кВт}$$

Увесь обсяг навантаження ЦОД забезпечується виключно за рахунок транзиту електроенергії із зовнішньої мережі 10/0,4 кВ.

Денний режим змішаного живлення з дефіцитом власної генерації (t [05:00 - 11:00] та t [15:00 - 21:00]) у ранкові та вечірні години, інтенсивність сонячного випромінювання є недостатньою для повного покриття потреб об'єкта. Система EMS реалізує алгоритм максимізації споживання відновлюваної енергії, а нестачу потужності плавно компенсує з мережі [13]:

$$P_{\text{мережі}}(t) = P_{\text{ЦОД}} - P_{\text{СЕС}}(t)$$

Саме цей режим дає основну фінансову віддачу — кожна кіловат-година від сонця це мінус одна кіловат-година з комерційної мережі.

У пікові години літнього дня — в інтервалі t [11:00–15:00] — потужність сонячного масиву може перевищувати поточне споживання об'єкта. Оскільки алгоритм Zero Export блокує передачу надлишкової енергії у зовнішню мережу, система EMS спрямовує різницю потужностей на заряджання акумуляторного накопичувача [25]:

$$P_{\text{АКБ}}(t) = P_{\text{СЕС}}(t) - P_{\text{ЦОД}}$$

$$W_{\text{заряд}}(t) = \int (P_{\text{СЕС}}(t) - P_{\text{ЦОД}}) \cdot \eta_{\text{заряд}} dt$$

Де $\eta_{\text{заряд}}$ ККД зарядного тракту двонаправленого PCS-перетворювача. Енергія що накопичується в цей період осідає в літій-залізо-фосфатному масиві і пізніше іде в роботу під час вечірнього піка — це і є основний спосіб підвищити загальний коефіцієнт автономності об'єкта.

2.3. Розрахунок необхідної встановленої потужності фотоелектричної системи.

Підібрати оптимальну потужність СЕС для критичної інфраструктури — задача не така проста як здається. Якщо намагатись закрити 100% споживання ЦОД тільки сонцем і тільки своїми силами — особливо взимку — доведеться ставити масив такої потужності, що це вже технічно безглуздо. Капітальні витрати злітають вгору, а влітку станція генерує стільки надлишків що їх просто нікуди дівати. [14, 25]

Базова математична модель для визначення необхідної встановленої потужності фотоелектричної системи P_{PV} формується на основі рівняння добового енергетичного балансу об'єкта і має такий вигляд [9]:

$$P_{PV} = \frac{E_{\text{доб}}}{H_{\text{доб}} \cdot PR}$$

P_{PV} — необхідна встановлена пікова потужність фотоелектричного масиву СЕС, кВт;

$E_{\text{доб}}$ — розрахункове добове споживання електроенергії дата-центром. Відповідно до інженерних розрахунків першого розділу, об'єкт споживає стабільну цілодобову потужність, що формує добову потребу на рівні $E_{\text{доб}} = 71\,779,2$ кВт·год;

$H_{\text{доб}}$ — середньорічна кількість еквівалентних годин роботи СЕС на номінальній потужності. Приймається $H_{\text{доб}} = 4,2$ год/добу;

PR — це узагальнений коефіцієнт продуктивності системи. В ньому зібрано все: теплові втрати в модулях, ККД інверторів і омичні втрати в кабелях. За ДСТУ EN 62548:2019 для промислових систем беруть $PR = 0,83$. [22]

Якщо рахувати під повне покриття добового споживання дата-центру за середньорічними кліматичними даними — теоретично необхідна потужність виходить:

					ЕТФ.КНУ.РВ.141.26.248С-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

$$P_{PV(100\%)} = \frac{71779,2}{4,2 \cdot 0,83} = 20590 \text{ кВт (20,6 МВт)}$$

Площу під СЕС рахують не просто під панелі — треба закласти технологічні проїзди і міжрядні інтервали щоб модулі не затінювали один одного. За нормативами питома щільність для статичних конструкцій $W_{\text{пит}}$ — 600 кВт на гектар корисної площі. [22] Тоді необхідна площа визначається як: $W_{\text{пит}}$

$$S_{\text{СЕС}} = \frac{P_{PV}}{W_{\text{пит}}}$$

Коефіцієнт автономного покриття добової енергопотреби дата-центру відображає відсоткову частку енергії, яку об'єкт отримує від власного відновлюваного джерела за добу, і визначається за формулою:

$$k_{\text{покр}} = \frac{E_{\text{СЕС_доб}}}{E_{\text{доб}}} \cdot 100\%$$

Потужність 20,6 МВт — це понад 30–35 гектарів корисної площі. На прилеглий території об'єкта таке просто не влізе. І це ще не все — влітку така станція видаватиме понад 140 МВт·год на добу, а куди дівати ці надлишки незрозуміло, бо жодна локальна акумуляторна система стільки не поглине. [13]

Тому потужність СЕС обирали не з розрахунку "покрити все", а через порівняння трьох реальних експлуатаційних сценаріїв:

1. Мінімальний (економічний) сценарій ($P_{PV} = 1 \text{ МВт}$)

Технічна суть: встановлюється мінімальний масив панелей, призначений для часткової компенсації денного піка споживання кліматичних систем ЦОД.

Енергетичний баланс: добовий виробіток становить близько $E_{\text{доб}} = 1000 \cdot 4,2 \cdot 0,83 = 3\,486 \text{ кВт·год}$,

де коефіцієнт автономного покриття становить $k_{\text{покр}} = \frac{3486}{71779,2} \cdot 100\% = 4,86\%$.

Необхідна площа ділянки: $S_{\text{СЕС}} = \frac{1000}{600} = 1,67 \text{ га}$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248С-5	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оцінка: потребує мінімальних інвестицій та площі (1,5 га), але рівень енергетичної автономії об'єкта залишається занижким, а вплив СЕС на надійність системи живлення є несуттєвим.

2. Базовий сценарій ($P_{PV}=3$ МВт)

Технічна суть: встановлена пікова потужність СЕС (3000 кВт) наближається до значення максимального розрахункового навантаження всього дата-центру .

Енергетичний баланс: добовий виробіток становить близько $E_{\text{доб}} = 3000 \cdot 4,2 \cdot 0,83 = 10\,458 \text{ кВт} \cdot \text{год}$,

де коефіцієнт автономного покриття становить $k_{\text{покр}} = \frac{10458}{71779,2} \cdot 100\% = 14,57\%$

Необхідна площа ділянки : $S_{\text{СЕС}} = \frac{3000}{600} = 5$ га

Оцінка: масив панелей раціонально розміщується на доступній території площею 5–5,5 га.

Денна генерація майже повністю споживається самим об'єктом, а полудневі надлишки ефективно накопичуються в акумуляторних батареях системи BESS/UPS для згладжування вечірнього максимуму без ризику видачі енергії в зовнішню мережу [14].

3. Посилений сценарій ($P_{PV}=5$ МВт)

Технічна суть: максимальне нарощування потужності фотоелектричного поля з метою збільшення частки автономного живлення в перехідні (осінньо-весняні) місяці року.

Енергетичний баланс: добовий виробіток становить близько $E_{\text{доб}} = 5000 \cdot 4,2 \cdot 0,83 = 17\,430 \text{ кВт} \cdot \text{год}$,

де коефіцієнт автономного покриття становить $k_{\text{покр}} = \frac{17430}{71779,2} \cdot 100\% = 24,28\%$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\text{Необхідна площа ділянки : } S_{\text{СЕС}} = \frac{5000}{600} = 8,33 \text{ га}$$

Оцінка: взимку цей сценарій дійсно кращий — але влітку він створює серйозну проблему. Опівдні станція видає близько 4500 кВт, а об'єкт споживає 2991 кВт. Лишок — 1500 кВт — нікуди не йде. Щоб його поглинути треба суттєво збільшувати акумуляторний парк, а це знову гроші. Якщо цього не зробити — EMS просто душить інвертори примусовим обмеженням, і тоді інвестиції в додаткові 2 МВт панелей втрачають будь-який сенс. [13, 25]

Щоб наочно порівняти всі три сценарії — побудовано діаграму ефективності варіантів інтеграції відновлюваного джерела, рисунок 2.4.

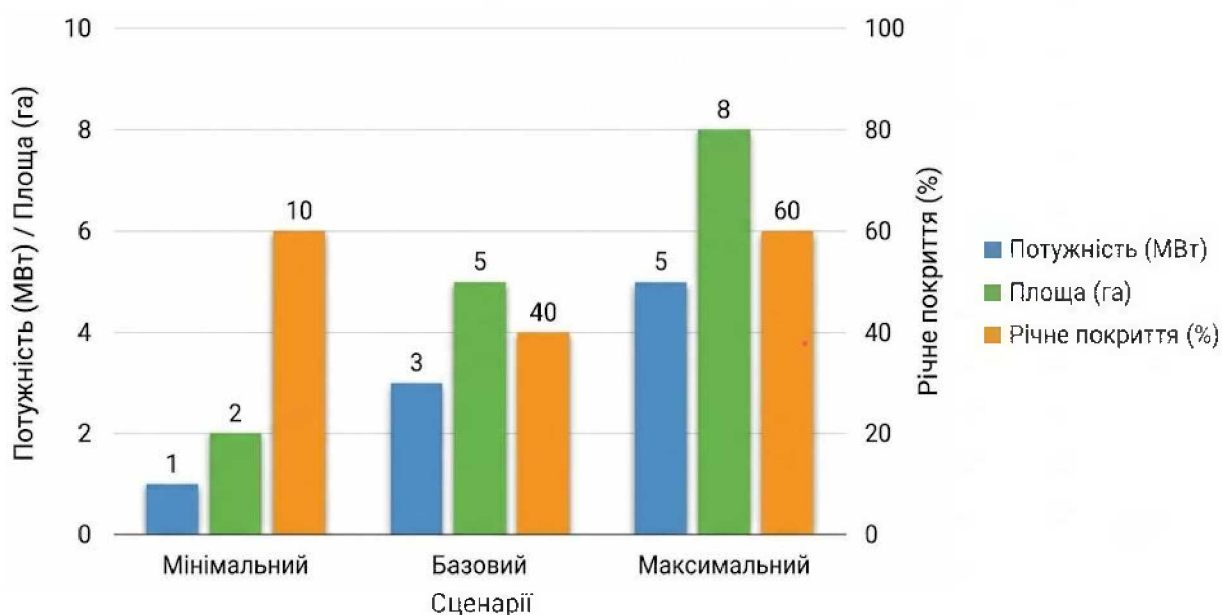


Рисунок 2.4 — Діаграма порівняння сценаріїв

Отже, після порівняння трьох сценаріїв зупинились на потужності 3 МВт — і на це є конкретні причини. По-перше, майданчик просто не потягне більше ніж 5 га. По-друге, якщо ставити більше панелей — влітку інвертори доведеться примусово душити, а це викинуті гроші. Потужність 3 МВт якраз та точка, де капітальні витрати ще розумні, а втрати від обмеження генерації — мінімальні.

2.4. Вибір типу та розрахунок кількості фотоелектричних модулів

Щоб набрати $P_{\text{СЕС}} = 3$ МВт встановленої потужності — треба правильно підібрати фотоелектричні модулі. Тут три головних критерії: максимальний ККД, мінімальні втрати потужності від нагріву і стійкість до деградації з часом. [9, 22]

Думаю краще обрати для встановлення монокристалічні двосторонні (Bifacial) сонячні панелі компанії Trina Solar серії Vertex (модель TSM-DE21 670W) [10].

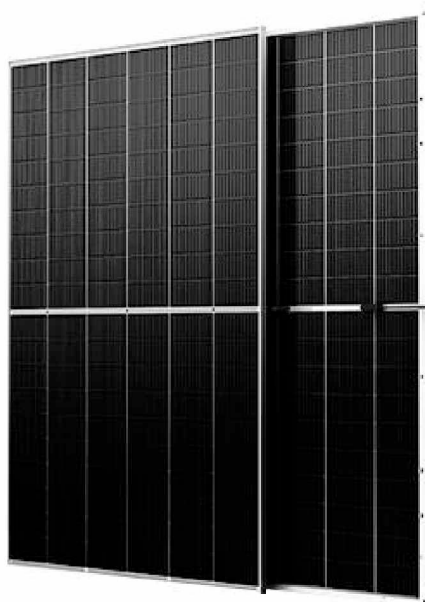


Рисунок 2.5 – Сонячна панель

Вибір впав на модулі з 210-мм кремнієвими пластинами, багатошинною архітектурою MBV і технологією пасивації тильної поверхні PERC. Саме це поєднання дає ККД понад 21% і дозволяє скоротити витрати на опорні конструкції та кабелі постійного струму. [14]

Електротехнічні параметри модуля Trina Solar Vertex TSM-DE21 670W при стандартних умовах випробувань — в таблиці 2.3.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Параметр сонячного модуля	Позначення	Значення параметру
Номінальна (пікова) потужність	$P_{\max}$	670 Вт
Напруга	U	38,2 В
Струм	I	17,55 А
Напруга холостого ходу	U_{xx}	46,1 В
Струм короткого замикання	$I_{kз}$	18,62 А
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	η	21,6 %
Температурний коефіцієнт напруги V_{oc}	βU_{xx}	-0,25 %/°C
Максимальна напруга системи (DC)	$U_{сис}$	1500 В

Таблиця 2.3 — Номінальні електротехнічні характеристики модуля TSM-DE21 670W

Теоретично необхідна кількість фотоелектричних модулів N для забезпечення сумарної проєктної потужності СЕС визначається за формулою:

$$N = \frac{P_{\text{СЕС}}}{P_{\max}}$$

$$N = \frac{3\,000\,000}{670} = 4477.61 \text{ шт}$$

Щоб отримати симетричну схему сонячного поля і оптимальне завантаження інверторів — розрахункове число модулів округлюється вгору до найближчого кратного значення. Приймаємо до встановлення $N = 4480$ модулів.

Номінальна потужність сонячного масиву при цьому становитиме:

$$P = 4480 \cdot 670 = 3\,001\,600 \text{ Вт}$$

Щоб вписатись в робочу напругу промислових інверторів до 1500 В — модулі з'єднуються в послідовні ланцюги по $n_{\text{мод}} = 28$ штук у кожному. Загальна кількість стрінгів станції: $n_{\text{мод}}$

$$n_{\text{ланц}} = \frac{N}{n_{\text{мод}}} = \frac{4480}{28} = 160 \text{ ланцюгів}$$

Кремнієві модулі доволі чутливі до температури — тому параметри стрінга обов'язково перевіряють при екстремальних умовах. Для Дніпропетровської області критична мінімальна температура повітря приймається на рівні $T_{\min} = -25^{\circ}\text{C}$. [22]

Максимальна напруга холостого ходу одного фотомодуля U_{xx_max} при розрахунковій мінімальній температурі визначається з урахуванням температурного коефіцієнта $\beta_{U_{xx}}$ за формулою [9]:

$$U_{xx_max} = U_{xx} \cdot \left[1 + \frac{\beta_{U_{xx}}}{100} \cdot (T_{\min} - T_{\text{ст}}) \right]$$

$$U_{xx_max} = 46.1 \cdot \left[1 + \frac{-0.25}{100} \cdot (-25 - 25) \right] = 51.86 \text{ В}$$

Розрахункове максимальне значення напруги холостого ходу всього послідовного стрінга $U_{\text{ланц_max}}$ за умови найнижчої температури становитиме:

$$U_{\text{ланц_max}} = 28 \cdot 51,86 = 1452,08 \text{ В}$$

$$U_{\text{ланц_max}} = n_{\text{мод}} \cdot U_{xx_max}$$

Перевірка виконання умови тривкості ізоляції обладнання згідно з ДСТУ:

$$U_{\text{ланц_max}} \leq U_{\text{сист}} \rightarrow 1452,08 \text{ В} \leq 1500 \text{ В}$$

Розрахунок підтверджує — конфігурація з 28 послідовних модулів працює безпечно навіть в найлютіший мороз. Напруга стрінга не виходить за граничний поріг ізоляції інвертора 1500 В, а отже ризик електричного пробоя виключено.

					ЕТФ.КНУ.РВ.141.26.248С-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

2.5. Проектування та розрахунок параметрів стрінгів PV-модулів

Розрахунок параметрів стрінгів потрібен щоб визначити граничні електричні характеристики — напругу і струм — які стануть вихідними даними для вибору інверторів у наступному підрозділі. [11, 22]

Сучасна практика проектування промислових СЕС орієнтується на системи постійного струму класу 1500 В. Щоб потрапити в оптимальний робочий діапазон напруги 1000–1200 В, приймаємо конфігурацію з $n_{\text{мод}} = 28$ послідовно з'єднаних модулів Trina Solar 670W.

Найбільш критичним параметром для безпеки обладнання є максимальна напруга холостого ходу ланцюга $U_{\text{ланц_хх_max}}$ при мінімальній розрахунковій температурі ($T_{\text{min}} = -25^\circ\text{C}$). Згідно з розрахунками в підрозділі 2.4:

Умова перевірки: $U_{\text{ланц_хх_max}} \leq U_{\text{вх_макс}} \rightarrow 1452,08 \leq 1500 \text{ В}$. Умова виконується, що гарантує цілісність вхідних каскадів інвертора під час зимових морозів.

Робоча напруга ланцюга в точці максимальної потужності $U_{\text{ланц_роб}}$ при стандартних умовах становить:

$$U_{\text{ланц_р}} = n_{\text{мод}} \cdot U_{\text{р}} = 28 \cdot 38,2 = 1069,5 \text{ В}$$

Необхідно також перевірити мінімальну робочу напругу ланцюга при максимальному нагріванні панелей влітку ($T_{\text{роб}} = +70^\circ\text{C}$). Температурний коефіцієнт робочої напруги складає -0,30 % [10]:

$$U_{\text{р_мін}} = 38,2 \cdot (1 + (-0,003 \cdot (70 - 25))) = 33,04 \text{ В}$$

$$U_{\text{ланц_р_мін}} = 28 \cdot 33,04 = 925,12 \text{ В}$$

Струм одного ланцюга в точці максимальної потужності дорівнює струму одного модуля: $I_{\text{ланц_р}} = 17,55 \text{ А}$. Сумарний струм двох паралельних ланцюгів, що підключаються на один вхід MPPT інвертора:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

$$I_{\text{сумар}} = 2 \cdot I_{\text{ланц}_p} = 2 \cdot 17,55 = 35,1 \text{ A}$$

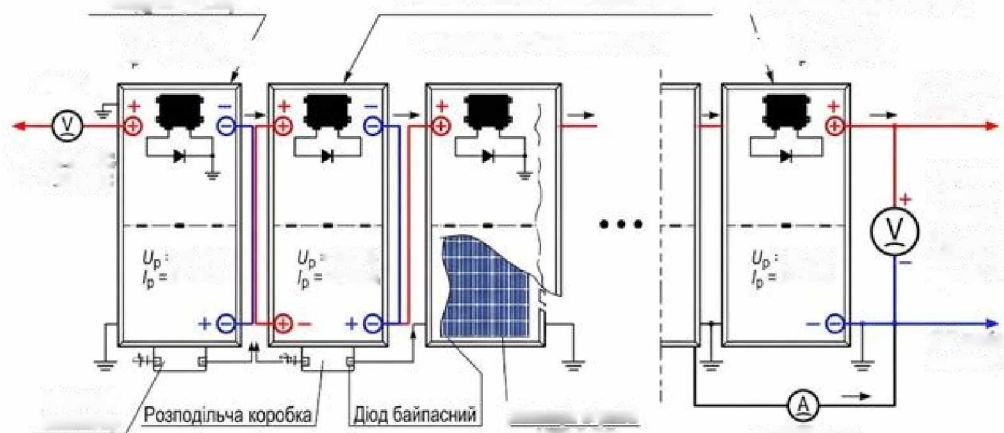


Рисунок 2.6 – Схема електричних з'єднань фотомодулів у послідовний ланцюг (стрінг).

Підсумкові результати розрахунку параметрів ланцюгів зведено в таблицю 2.4.

Найменування параметру	Позначення	Значення
Кількість модулів у ланцюзі	$n_{\text{мод}}$	28 шт.
Робоча напруга ланцюга (STC)	$U_{\text{ланц}_p}$	1069,6 В
Напруга холостого ходу (STC)	$U_{\text{ланц}_xx}$	1290,8 В
Максимальна напруга ланцюга (при -25 °C)	$U_{\text{ланц}_xx_max}$	1452,1 В
Робочий струм ланцюга (STC)	$I_{\text{ланц}_p}$	17,55 А
Струм короткого замикання ланцюга	$I_{\text{ланц}_кз}$	18,62 А

Таблиця 2.4 — Розрахункові параметри одного ланцюга ФЕМ Trina Solar

2.6. Вибір інверторного обладнання та перевірка характеристик

Інвертори — це серце фотоелектричної станції. В обраній гібридній архітектурі з АС-зв'язком сонячна система будується на промислових мережевих інверторах: в нормальному режимі вони синхронізуються із зовнішньою мережею 0,4 кВ, а в аварійному — підхоплюють опорну частоту і напругу від системи накопичення енергії та ДБЖ. [14, 23]

Для системи постійного струму на 1500 В розглянули два промислових інвертори від лідерів ринку: Huawei SUN2000-215KTL-H0 [11] та Sungrow SG250HX. Підвищена номінальна напруга тут не випадкова — вона мінімізує втрати на етапі перетворення.

Порівняльний аналіз їхніх електротехнічних та експлуатаційних характеристик за вимогами ДСТУ EN 62548:2019 [22] — в таблиці 2.5.

Технічний параметр	Позначення	Huawei SUN2000-215KTL-H0	Sungrow SG250HX
Номінальна вихідна АС-потужність	$P_{AC_ном}$	215 кВт	250 кВт
Максимальна вхідна DC-напруга	$U_{вх_макс}$	1500 В	1500 В
Діапазон робочої напруги MPPT	U_{MPPT}	500...1500 В	500...1500 В
Нижній поріг MPPT при повній потужності	$U_{MPPT_мін}$	900 В	860 В
Кількість трекерів макс. потужності	n_{MPPT}	9	12
Кількість вхідних DC-конекторів	$n_{вх}$	18 (2 на один MPPT)	24 (2 на один MPPT)
Максимальний вхідний струм на один MPPT	$I_{MPPT_мін}$	100 А	30 А
Максимальний коефіцієнт корисної дії	$\eta_{макс}$	99,0 %	99,0 %

Таблиця 2.5 — Порівняльний аналіз характеристик промислових інверторів 1500 В

За результатами порівняльного аналізу для реалізації проєкту обрано інвертори Huawei SUN2000-215KTL-H0. Виходячи із встановленої потужності сонячного поля $P_{\text{СЕС}} = 3000$ кВт, необхідна кількість $N_{\text{інв}}$ інверторів визначається за формулою:

$$N_{\text{інв}} = \frac{P_{\text{СЕС}}}{P_{\text{АС_ном}}} = \frac{3000}{215} = 14 \text{ шт}$$

Приймаємо до встановлення **14 інверторів** загальною вихідною потужністю:

$$P_{\text{АС_заг}} = 14 \cdot 215 = 3010 \text{ кВт}$$

Для підтвердження працездатності і безпеки обраного рішення виконано перевірку електричних параметрів за чотирма критеріями відповідно до нормативних вимог:

а) Перша перевірка — максимальна напруга в найхолодніший день при $T_{\text{мін}} = 25^{\circ}\text{C}$. Напруга холостого ходу стрінга не повинна перевищувати граничну вхідну напругу інвертора:

$$U_{\text{вх_макс}} \geq U_{\text{ланц_хх_макс}}$$

$$1500 \text{ В} \geq 1452,08 \text{ В}$$

Умова виконана — запас по ізоляції становить 3,2%, і це виключає ризик пробою в найхолодніші дні..

б) Друга перевірка — робоча напруга в найспекотніший день при $T_{\text{роб}} = +70^{\circ}\text{C}$. Мінімальна напруга стрінга має залишатись вище нижньої межі діапазону MPPT інвертора:

$$U_{\text{ланц_р_мін}} \geq U_{\text{MPPT_мін}}$$

$$925,12 \text{ В} \geq 900 \text{ В}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Умова виконана — навіть в найспекотніші дні інвертор залишається в діапазоні MPPT і працює з максимальним ККД без жодних збоїв у відстеженні точки максимальної потужності.

в) перевірка за струмовим критерієм (узгодження за потужністю ФЕМ):

Третя перевірка — струм короткого замикання. Сумарний струм від усіх ланцюгів на одному MPPT не повинен виходити за паспортне обмеження трекера. На один MPPT підключається 2 ланцюги, тому:

$$I_{\text{MPPT_макс}} \geq 2 \cdot I_{\text{ланц_кз}}$$

$$I_{\text{MPPT_макс}} \geq 2 \cdot 18,62 = 37,24 \text{ А}$$

Для інвертора Huawei: $100 \text{ А} \geq 37,24 \text{ А}$ — умова виконується з великим запасом.

г) перевірка за коефіцієнтом перевантаження інвертора $K_{\text{пер}}$

Перевірка — коефіцієнт перевантаження DC/AC. Для промислових СЕС оптимальне співвідношення потужності постійного струму до змінного має перебувати в межах: $1,0 \leq K_{\text{пер}} \leq 1,2$

При загальній кількості 160 ланцюгів на 14 інверторів навантаження розподіляється нерівномірно: 8 інверторів беруть по 11 ланцюгів, решта 6 — по 12. Перевіряємо найбільш завантажений варіант — інвертор з 12 ланцюгами:

$$P_{\text{DC_інв}} = n_{\text{ланц}} \cdot n_{\text{мод}} \cdot P_{\text{макс}} = 12 \cdot 28 \cdot 670 = 225120 \text{ Вт} = 225,12 \text{ кВт}$$

$$K_{\text{пер}} = \frac{P_{\text{DC_інв}}}{P_{\text{AC_ном}}}$$

$$K_{\text{пер}} = \frac{225,12 \text{ кВт}}{215 \text{ кВт}} = 1,047$$

Значення $K_{\text{пер}} = 1,047$ вписується в нормативний діапазон — інвертор працює з максимальною віддачею і при цьому без ризику теплового перевантаження чи передчасного зносу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Підсумок по інверторному комплексу: до встановлення приймається 14 мережевих інверторів Huawei SUN2000-215KTL-H0 загальною потужністю 3010 кВт. Вони повністю сумісні з обраними модулями за струмом, мають вбудований захист від дугового розряду і забезпечують оптимальний режим роботи всього сонячного поля.



Рисунок 2.7 — Загальний вигляд промислового інвертора Huawei SUN2000-215KTL-H0

2.7. Розрахунок системи накопичення енергії (АКБ) для дата-центру

Дата-центр — це об'єкт де будь-який збій напруги, навіть короткочасний, є неприйнятним. Стандарт ТІА-942 в цьому питанні однозначний. [18, 24] Саме тому система накопичення енергії — це не опція, а обов'язкова частина проекту.

В даному проєкті прийнято базовий сценарій резервування: критичні ІТ-навантаження і системи прецизійного охолодження мають гарантовано працювати від акумуляторів протягом 2 годин. Цього вистачає щоб пережити більшість аварій у зовнішній мережі 0,4 кВ або коректно переключитись на резервні дизельні генератори. [12]

Потужність критичного навантаження дата-центру приймається на рівні розрахункового максимуму: $P_{\text{крит}} = 3000 \text{ кВт}$.

Для розрахунку необхідної енергетичної ємності акумуляторної батареї $E_{\text{акб}}$ застосовується класична формула [22]:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_{\text{АКБ}} = \frac{P_{\text{крит}} \cdot t_{\text{авт}}}{DOD \cdot \eta}$$

$$E_{\text{АКБ}} = \frac{3000 \cdot 2}{0.9 \cdot 0.95} = 7017.54 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Для досягнення необхідної ємності близько 7 МВт·год і безшовної інтеграції з інверторним комплексом обрано промислову контейнерну систему накопичення Huawei LUNA2000-2.0MWH. [11] Один контейнер — це 2 МВт·год енергії.

Визначаємо необхідну кількість контейнерів BESS:

$$N_{\text{АКБ}} = \frac{7017.54}{2000} = 3.51 \text{ шт}$$

Щоб мати технологічний резерв і не доводити елементи до повного розряду — кількість контейнерів округлюється вгору. Приймаємо до встановлення 4 контейнери. Фактична ємність системи накопичення становитиме:

$$E_{\text{АКБ_вст}} = 4 \cdot 2000 = 8000 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$



Рисунок 2.8 — Загальний вигляд промислової контейнерної системи накопичення енергії Huawei LUNA2000-2.0MWH

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Висновок до розділу 2

У цьому розділі виконано електротехнічне обґрунтування і підібрано основне обладнання сонячної електростанції для живлення малого дата-центру:

Підсумуємо що обрано і чому:

Потужність СЕС — 3 МВт піку, фактична розрахункова 3,0016 МВт. Вписується в площу майданчика і не створює зайвих надлишків що призвело б обмеженням генерації.

Модулі — 4480 штук Trina Solar Vertex TSM-DE21 670W, монокристал, двостороннє виконання.

Схема стрінгів — 160 послідовних ланцюгів по 28 панелей. Напруга холостого ходу при -25°C виходить 1452,1 В — в межах ліміту 1500 В DC.

Інвертори — 14 одиниць Huawei SUN2000-215KTL-H0, загальна потужність 3010 кВт. Тягнуть до 100 А на MPPT-трекер, є вбудований дуговий захист AFCI.

Система накопичення — 4 контейнери Huawei LUNA2000-2.0MWH, загальна ємність 8 МВт·год. Забезпечує 2 години повної автономії для критичного ІТ-навантаження 3000 кВт — рівень надійності Tier III/IV.

Річний виробіток за моделюванням PVGIS — 3 456 000 кВт·год. Це 13,2% від загального річного споживання дата-центру, що відчутно знижує обсяги закупівлі з зовнішньої мережі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

РОЗДІЛ 3. Розробка електричної схеми підключення, вибір кабелів і захистів.

3.1. Побудова структурної схеми системи електропостачання

Структурна схема розроблена щоб показати як взаємодіють основні вузли гібридної системи живлення дата-центру — хто від кого живиться і як розподіляються потоки потужності (ДСТУ EN 62548:2019, ДСТУ EN 62446-1:2022, ДСТУ HD 60364-7-712:2022). [22,25,26]

Тракт генерації від СЕС. Все починається з фотоелектричних модулів згрупованих у послідовні стрінги. Постійний струм напругою до 1500 В проходить через апарати DC-захисту — запобіжники, роз'єднувачі і ПЗП — і потрапляє на MPPT-трекери інверторів Huawei SUN2000-215KTL-H0. Інвертори перетворюють його на трифазний змінний струм 0,4 кВ і передають на головний АС-щит дата-центру.

Тракт живлення від мережі та резервування. Опорним джерелом напруги є зовнішня мережа 0,4 кВ — вона заходить на головний АС-щит через ввідний автомат. Звідси некритичні споживачі — допоміжні системи і загальне освітлення — живляться безпосередньо. Для ІТ-інфраструктури виділена окрема лінія з інтеграцією в систему накопичення Huawei LUNA2000 ємністю 8 МВт·год. Ця система формує ізольовану шину гарантованого живлення — і вже до неї підключається все критичне: сервери, системи зберігання даних і прецизійне охолодження. Що б не відбувалось із зовнішньою мережею — ця шина працює стабільно.

На рисунку 3.1 зображено розроблену структурну схему гібридної системи електропостачання об'єкта.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив		Гончарова М.О.			Розділ 3		Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пересулько І.І.						43	9
				КНУ гр. ЕЕМ-22-2					
Н. Контр.		Пересулько І.І.							
Затвердж.		Пересулько І.І.							

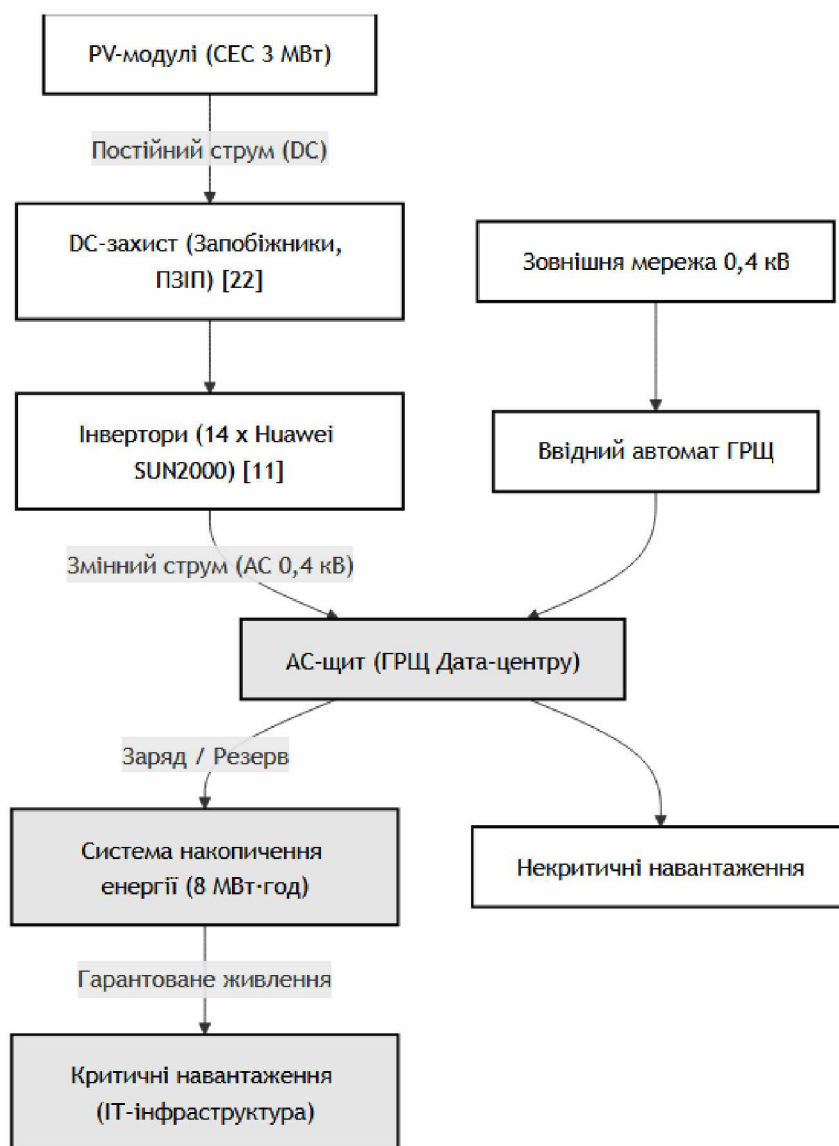


Рисунок 3.1 — Структурна схема електропостачання малого дата-центру

3.2. Розробка однолінійної схеми електричних з'єднань

Щоб деталізувати електричні зв'язки і підібрати комутаційну та захисну апаратуру — розроблено принципову однолінійну схему гібридної СЕС дата-центру. Схема показує повний шлях струму від PV-масиву до кінцевих розподільних пристроїв і виконана з дотриманням вимог ДСТУ EN 62548:2019 [22] щодо DC-проводки, комутації, заземлення та захисту фотоелектричних масивів.

Відповідно до вимог ДСТУ EN 62446-1:2022 [25] та ДСТУ HD 60364-7-712:2022 [26], схема містить усі обов'язкові вузли безпеки та контролю:

1. Зона постійного струму охоплює PV-масив із послідовних стрінгів панелей Trina Solar 670W. Робочий струм модуля — 17,55 А, струм короткого замикання — 18,62 А. [10]

2. Інверторне обладнання — промисловий мережевий інвертор Huawei SUN2000-215KTL-H0 [11], який перетворює постійний струм від панелей на трифазний змінний промислової частоти.

3. Зона змінного струму. На виході інвертора стоїть АС-автомат для захисту від струмів КЗ з боку мережі і SPD тип II для захисту від атмосферних та комутаційних перенапруг. [26]

4. Резервування і критичні навантаження. З головного АС-щита виділена лінія йде на систему накопичення UPS/АКБ — контейнери Huawei LUNA2000. [11] Вона формує ізольовану шину і безпосередньо живить щит критичних навантажень — всю ІТ-інфраструктуру дата-центру.

5. Заземлення. Рами панелей, корпуси інверторів і щитів, клеми SPD — все це об'єднано і підключено до головної заземлювальної шини об'єкта відповідно до вимог електробезпеки. [25]

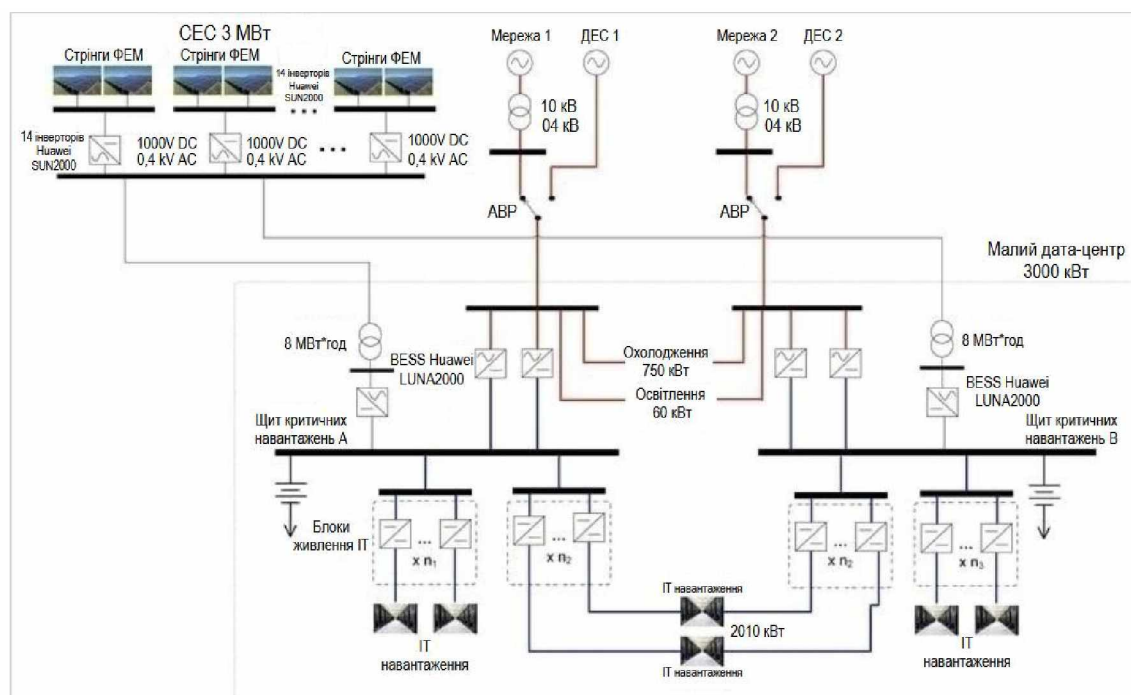


Рисунок 3.2 — Однолінійна принципова схема електричних з'єднань СЕС та дата-центру

3.3. Розрахунок та вибір перерізу кабельних ліній DC та AC контурів

Переріз кабелів підбирається за двома критеріями — допустимим струмовим навантаженням і граничною втратою напруги. Розрахунок ведеться за ДСТУ ІЕС 60364-5-52:2015 [16] та ДСТУ EN 62548:2019. [22] Допустима втрата напруги: для DC-ліній не більше 1,5%, для AC-ліній — не більше 3%. [24] Питомий опір міді — 0,0175 Ом·мм²/м.

• Розрахунок DC-кабелю

Вихідні дані з підрозділу 2.5: робочий струм стрінга — 17,55 А, робоча напруга — 1069,6 В, довжина траси — 50 м. До встановлення приймається спеціалізований сонячний мідний кабель з подвійною ізоляцією марки H1Z2Z2-K (PV1-F) перерізом 6 мм². [22]

Умова нагрівання: допустимий струм кабелю $I_{\text{доп}} = 55 \text{ А}$. Умова $55 \text{ А} \geq 17,55 \text{ А}$ виконується із запасом.

$$\text{Перевірка втрати напруги } \Delta U = 2 \cdot I_p \cdot L \cdot \frac{\rho}{S} = 2 \cdot 17,55 \cdot 50 \cdot \frac{0,0175}{6} = 5,12 \text{ В}$$

$$\text{Втрата напруги: } \Delta U\% = \frac{5,12}{1069,6} \cdot 100\% = 0,48\% \leq 1,5\% \text{ виконується.}$$

• Розрахунок AC-кабелю

$$\text{Струм: } I_{\text{інв}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi} = \frac{215000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,99} = 313,5 \text{ А}$$

До встановлення приймається силовий мідний кабель ВВГнг-LS4 × 185 мм² [15].

Умова нагрівання $I_{\text{доп}} 410 \text{ А} \geq 313,5 \text{ А}$ виконується.

$$\text{Перевірка втрати напруги } \Delta U = \sqrt{3} \cdot I_{\text{інв}} \cdot L \cdot \frac{\rho}{S} = \sqrt{3} \cdot 313,5 \cdot 30 \cdot \frac{0,0175}{185} = 1,54\%$$

$$\text{Втрата напруги: } \Delta U\% = \frac{1,54}{400} \cdot 100\% = 0,38\% \leq 3\% \text{ виконується.}$$

					ЕТФ.КНУ.РВ.141.26.248С-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

- **Розрахунок кабельних магістралей критичного навантаження**

$$\text{Струм: } I_{\text{крит}} = \frac{P_{\text{крит}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi} = \frac{2010000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.95} = 3053,8 \text{ А}$$

Для передачі струму понад 3000 А застосовується розщеплення фаз. [16]
Приймається конфігурація з 8 паралельних ліній кабелю ВВГнг-LS 4×240 мм².
[15] Струмове навантаження на одну лінію при цьому складає: 3053,8 / 8 = 381,7 А.

Умова нагрівання $I_{\text{доп}} 460 \text{ А} \geq 381,7 \text{ А}$ виконується.

$$\text{Перевірка втрати напруги } \Delta U = \sqrt{3} \cdot I_{\text{лін}} \cdot L \cdot \frac{p}{S} = \sqrt{3} \cdot 381,7 \cdot 15 \cdot \frac{0.0175}{240} = 0,72 \%$$

$$\text{Втрата напруги: } \Delta U\% = \frac{0,72}{400} \cdot 100\% = 0.18\% \leq 3\% \text{ виконується.}$$

3.4. Вибір апаратів захисту та комутаційного обладнання

Комутаційна і захисна апаратура підбирається виходячи з розрахункових струмів короткого замикання і максимальних робочих струмів кожної ділянки кола. Розрахунок базується на вимогах ДСТУ HD 60364-7-712:2022 [26] та ІЕС 62548-1:2023. [22]

1. Захист DC-сторони — від панелей до інвертора. Для захисту стрінгів Trina Solar 670W від зворотних струмів встановлюються циліндричні DC-запобіжники. Струм короткого замикання модуля — 18,62 А. Умова вибору номінального струму плавкої вставки: [22]

$$I_{\text{запоб}} \geq 1,56 \cdot I_{\text{кз}}$$

$$I_{\text{запоб}} \geq 1,56 \cdot 18,62 = 29,05$$

До встановлення приймаються запобіжники номіналом 30 А / 1500 В DC [18].

Головний DC-роз'єднувач комутує сумарний струм двох стрінгів на один MPPT — 35,1 А. Умови вибору:

$$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{ланц хх макс}} \rightarrow 1500 \geq 1452,1 \text{ В}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

$$I_{\text{ном}} \geq 1,25 \cdot I_{\text{сумар}} \rightarrow I_{\text{ном}} \geq 1,25 \cdot 35,1 = 43,87 \text{ A}$$

Обираємо DC-роз'єднувач на 50 А / 1500 В DC. Для відведення імпульсів перенапруги паралельно встановлюється ПЗІП (SPD) DC Тип II [22].

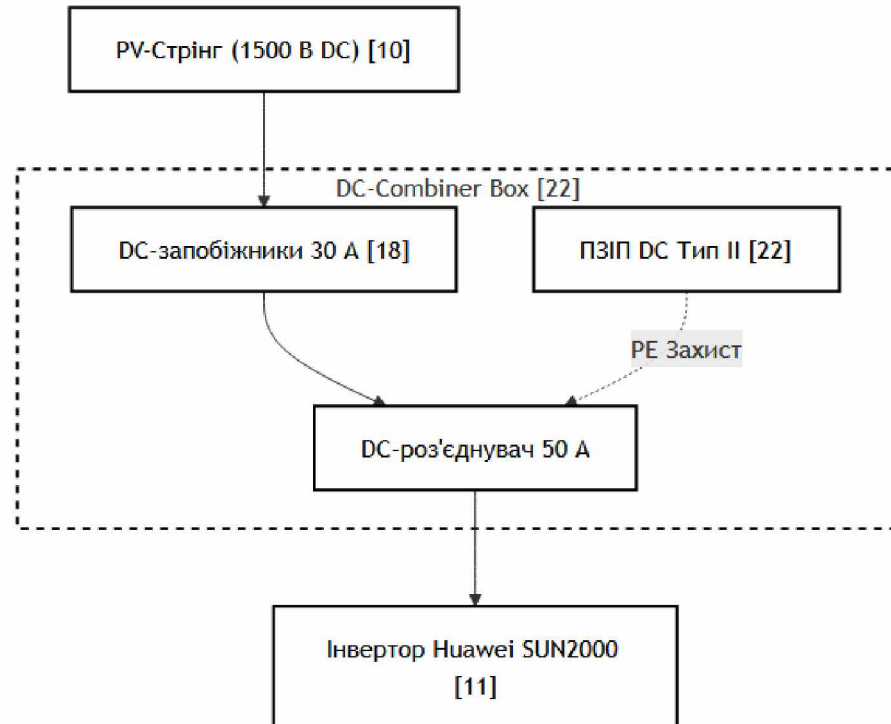


Рисунок 3.3 — Схема DC-частини генеруючого блоку

2. Захист АС-сторони — від інвертора до ГРЩ. Розрахунковий вихідний струм інвертора Huawei SUN2000-215KTL-H0 становить 313,5 А. [11] Умова вибору номіналу автоматичного вимикача:

$$I_{\text{авт}} \geq 1,25 \cdot I_{\text{інв}}$$

$$I_{\text{авт}} \geq 1,25 \cdot 313,5 = 391,8 \text{ A}$$

Обирається промисловий автоматичний вимикач у литому корпусі — MCCB номіналом 400 А зі струмом відключення не менше 50 кА, серія Compact NSX. [17] Додатково встановлюється ПЗІП АС тип II. [26]

3. Система накопичення резервує критичні навантаження дата-центру — 2010 кВт. Розрахунковий робочий струм магістралі становить 3053,8 А. Для захисту головних ліній резервування застосовуються повітряні автоматичні вимикачі АСВ номіналом 3200 А / 400 В. [17] Розподіл живлення на ІТ-обладнання виконується через групові автомати з дотриманням селективності спрацювання.

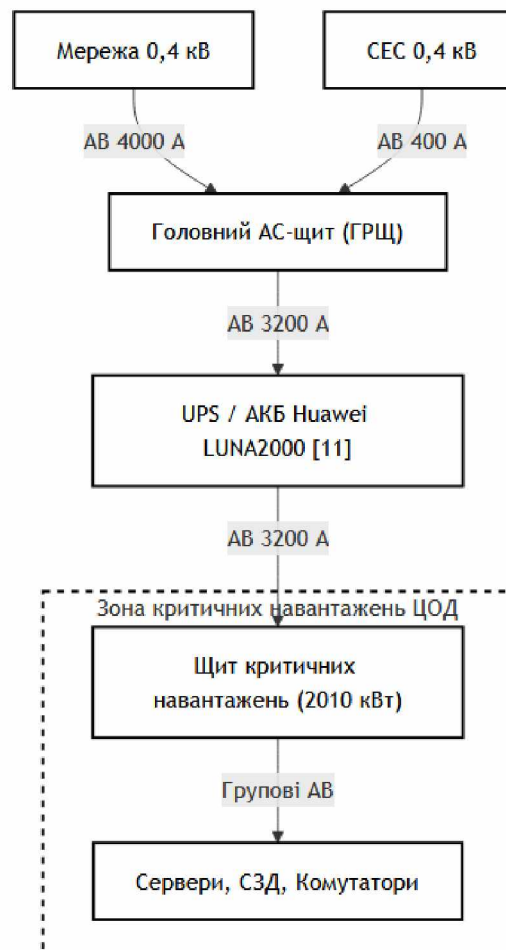


Рисунок 3.4 — Схема резервування критичних навантажень

3.5. Опис режимів роботи системи в нормальних та аварійних умовах

Робота гібридної системи електропостачання керується контролером EMS, який в реальному часі розподіляє потоки потужності між сонячним масивом, зовнішньою мережею і акумуляторним накопичувачем. Виходячи з вимог до безперебійності ІТ-навантажень визначено п'ять експлуатаційних режимів.

Режим	Джерело живлення	Пояснення
День, нормальна робота	СЕС + мережа	СЕС покриває частину навантаження дата-центру, зовнішня мережа компенсує дефіцит потужності.
День, надлишок генерації	СЕС	Надлишок генерації заряджає АКБ. За дозволеної схеми надлишок віддається в мережу, інакше — обмежується інвертором.
Ніч (відсутність інсоляції)	Мережа + UPS у резерві	Дата-центр живиться від зовнішньої мережі. АКБ очікує аварії або дозаряджається за нічним тарифом.
Аварія мережі	UPS / АКБ	Безперервно живляться критичні навантаження (ІТ-інфраструктура). Некритичні навантаження (кліматика) автоматично відключаються.
Відновлення мережі	Мережа + інвертор / ЗП	Відбувається перехід у нормальний режим роботи та пріоритетний заряд розряджених АКБ.

Таблиця 3.1 — Експлуатаційні режими роботи системи

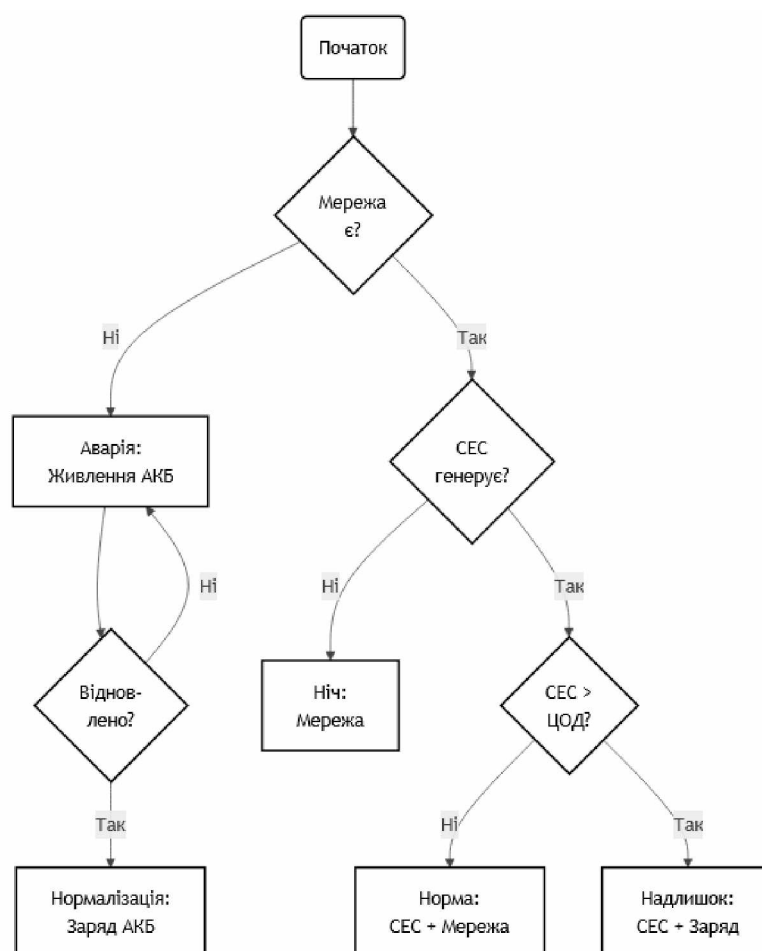


Рисунок 3.5 — Блок-схема алгоритму роботи гібридної системи електропостачання

Висновки до розділу 3

У цьому розділі спроектовано електричну частину гібридної СЕС. Розроблена схема і підібране обладнання повністю закривають вимоги до електропостачання малого дата-центру. Конкретно зроблено наступне:

Підключення СЕС — розроблено структурну і принципову однолінійну схеми для паралельної роботи сонячної станції із зовнішньою мережею 0,4 кВ.

Резервування — сформовано надійний контур резервування критичних ІТ-навантажень 2010 кВт через контейнерну систему накопичення енергії UPS/АКБ.

Захист DC і AC кіл — розраховано струми і підібрано апарати захисту: DC-запобіжники 30 А, DC-роз'єднувачі, AC-автомати 400 А і 3200 А. Струми короткого замикання обладнанню не загрожують.

Контроль і безпека — передбачено ПЗІП тип ІІ для відведення імпульсних перенапруг і система моніторингу для безпечної експлуатації як в нормальному, так і в аварійному режимі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. Математичне моделювання режимів роботи гібридної СЕС для живлення дата-центру

4.1. Модель навантаження дата-центру

Математичне моделювання виконано щоб перевірити працездатність гібридної системи електропостачання малого дата-центру — СЕС, зовнішня мережа 10/0,4 кВ, BESS/UPS і система EMS. Все реалізовано у вигляді одного MATLAB Live Script з погодинним кроком розрахунку протягом року.

Суть моделі проста — побудувати енергетичний баланс між генерацією СЕС, споживанням дата-центру, зарядом і розрядом акумуляторів та закупівлею з мережі. Це дозволяє не просто порахувати річний виробіток, а й подивитись на добові режими, стан заряду батарей, аварійні сценарії і економічний ефект від впровадження системи.

Електромагнітні перехідні процеси інверторів, форма ШІМ-сигналів і гармонічний склад струмів у моделі не деталізуються — вона працює на рівні енергетичного планування і техніко-економічного обґрунтування, що цілком достатньо для кваліфікаційної роботи.

Повне електричне навантаження дата-центру в розрахунковій моделі визначається як сума чотирьох складових: критичного ІТ-навантаження, навантаження системи охолодження, власних потреб UPS та допоміжних споживачів:

$$P_{load}(t) = P_{IT}(t) + P_{cool}(t) + P_{UPS.aux}(t) + P_{aux}(t).$$

ІТ-навантаження в моделі прийнято сталим — сервери, накопичувачі і мережеве обладнання працюють цілодобово без зупинок. Навантаження охолодження, на відміну від цього, змінюється залежно від температури зовнішнього повітря — влітку воно зростає, взимку падає.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив		Гончарова М.О.			Розділ 4		Лім.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пересунько І.І.						52	15
							КНУ гр. ЕЕМ-22-2		
Н. Контр.		Пересунько І.І.							
Затвердж.		Пересунько І.І.							

Це дозволяє реалістично відобразити сезонну динаміку споживання об'єкта.

$$P_{cool}(t) = P_{cool.nom} \cdot k_T(t),$$

де $k_T(t)$ — коефіцієнт температурного впливу, який нормується так, щоб середньорічна потужність охолодження відповідала прийнятому номінальному значенню.



Рисунок 4.1 — Структура розрахункової потужності дата-центру

Стовпчиковий графік показує структуру електричного навантаження дата-центру в розрізі основних груп споживачів: IT-інфраструктура, охолодження, UPS і допоміжні пристрої, освітлення та сервісні споживачі.

Домінує IT-інфраструктура — 2010 кВт, це близько 67,2% загального навантаження. Друга за величиною група — система охолодження — 750 кВт або 25,1%. Власні потреби UPS складають 170,8 кВт, освітлення і сервісні споживачі — 60 кВт.

Графік наочно підтверджує — резервування треба в першу чергу орієнтувати на IT-навантаження. Охолодження при цьому розглядається як гарантоване, але не абсолютно безперебійне навантаження.

4.2. Модель генерації сонячної електростанції

Генерація СЕС будується на основі помісячного прогнозного виробітку для станції 3 МВт. Всередині кожного місяця MATLAB Live Script формує погодинний добовий профіль з урахуванням тривалості світлового дня, форми сонячної кривої і випадкової хмарності. Далі профіль масштабується так щоб місячна енергія збігалась із заданим прогнозом.

$$E_{PV.month} = \sum P_{PV}(t) \cdot \Delta t.$$

Узагальнено генерацію СЕС можна описати залежністю:

$$P_{PV}(t) = P_{PV.nom} \cdot f_{sun}(t) \cdot k_{cloud}(t),$$

де $P_{PV.nom}$ — встановлена потужність сонячної електростанції; $f_{sun}(t)$ — добова функція сонячної генерації; $k_{cloud}(t)$ — коефіцієнт хмарності. У моделі також передбачено обмеження пікової потужності інверторів.

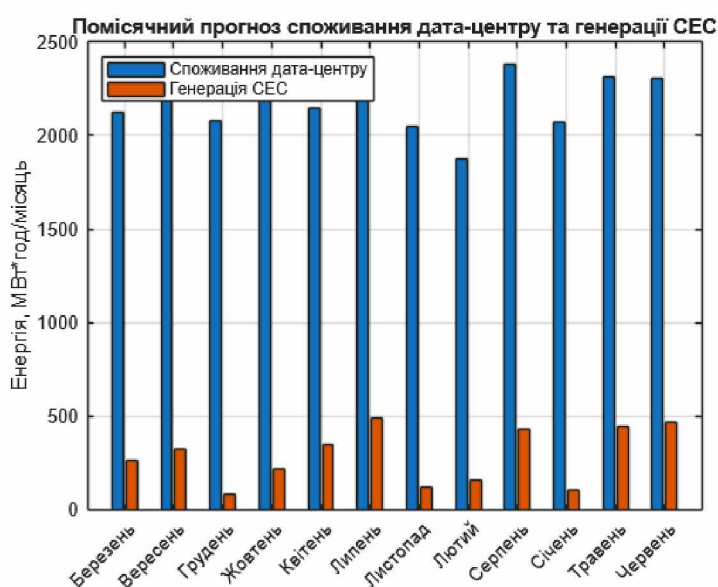


Рисунок 4.2 — Помісячний прогноз споживання дата-центру та генерації СЕС

Графік порівнює місячне споживання дата-центру з місячною генерацією СЕС. Споживання тримається практично на одному рівні весь рік — дата-центр працює цілодобово без вихідних. Генерація СЕС навпаки має чітку сезонність.

Влітку виробіток виходить на максимум, взимку суттєво падає. За рік СЕС генерує близько 3,456 ГВт·год — це 13,2% від річного споживання об'єкта в 26,2 ГВт·год.

Графік наочно показує що повністю закрити потреби дата-центру сонячною станцією неможливо. Але вона відчутно скорочує закупівлю з мережі в денні години — і особливо це помітно в літній період.

4.3. Баланс активної потужності

У кожний момент часу в моделі виконується баланс активної потужності між чотирма елементами системи — навантаженням, генерацією СЕС, зовнішньою мережею і BESS:

$$P_{load}(t) = P_{PV.to.load}(t) + P_{grid}(t) + P_{BESS.dis}(t) - P_{BESS.ch}(t).$$

Позитивне значення $P_{BESS.dis}(t)$ відповідає розряду акумуляторної системи, а $P_{BESS.ch}(t)$ — її заряду. У моделі прийнято режим Zero Export, тому передача надлишкової електроенергії у зовнішню мережу не допускається:

$$P_{grid}(t) \geq 0.$$

Коли СЕС генерує більше ніж споживає об'єкт — надлишок іде на заряд BESS. Якщо акумулятори вже заряджені до верхньої межі SOC — інвертор просто обмежує генерацію.

4.4. Модель стану заряду BESS

Стан заряду акумуляторної системи SOC змінюється залежно від потужності заряду, потужності розряду та ККД перетворення енергії:

$$SOC(t+\Delta t) = SOC(t) + \eta_{ch} \cdot P_{ch}(t) \cdot \Delta t / E_{BESS} - P_{dis}(t) \cdot \Delta t / (\eta_{dis} \cdot E_{BESS}).$$

У моделі встановлено обмеження:

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}.$$

Додатково введено резервний рівень $SOC_{reserve} = 55\%$ — нижче цієї позначки акумулятор не використовується для цінового арбітражу. Ця енергія

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248С-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

резервується виключно для аварійного живлення критичного ІТ-навантаження.
Корисний діапазон ємності при SOC 20–90% становить:

$$E_{\text{use}} = E_{\text{BESS}} \cdot (\text{SOC}_{\text{max}} - \text{SOC}_{\text{min}}) = 8 \cdot (0,90 - 0,20) = 5,6 \text{ МВт} \cdot \text{год}$$

З урахуванням ККД розряду 0,95 теоретична автономність критичного ІТ-навантаження 2010 кВт у повному діапазоні SOC 20–90% виходить близько 2,65 години.

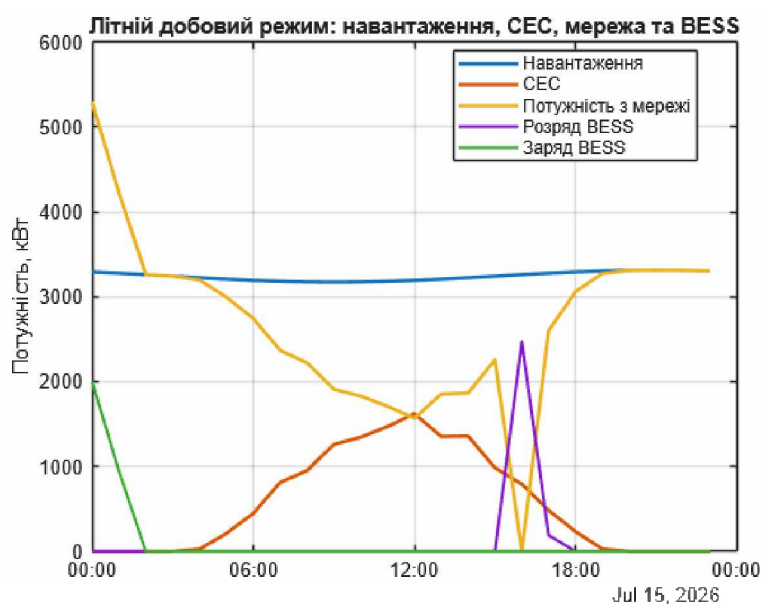


Рисунок 4.3 — Добовий режим у літній день

Графік показує добову картину літнього дня — як змінюються навантаження, сонячна генерація, потужність з мережі і стан BESS протягом 24 годин.

Вдень сонячна генерація бере на себе частину навантаження і знижує скільки треба тягнути з мережі. Коли виникає надлишок або ціна на електроенергію низька — BESS заряджається. В дорогі години система частково розряджає акумулятори, але не опускається нижче резервного рівня SOC.

Графік наочно демонструє логіку EMS в нормальному режимі: СЕС іде першою, мережа закриває дефіцит, а BESS згладжує графік і допомагає економити на різниці цін.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5

Арк.

56

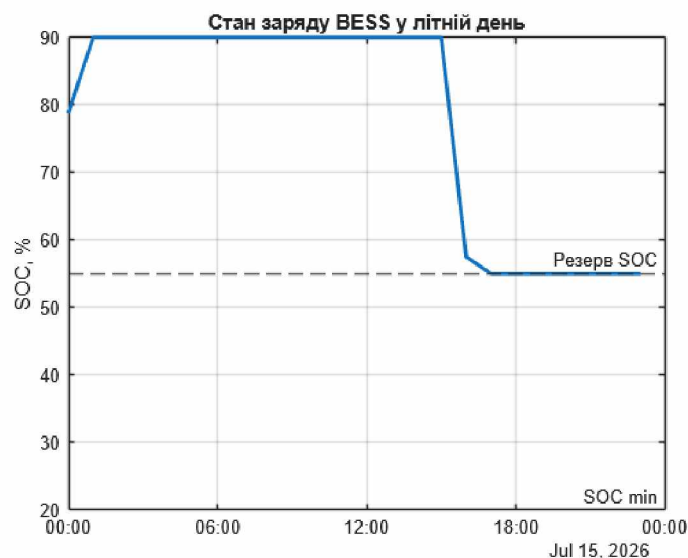


Рисунок 4.4 — SOC BESS у літній день

Графік показує як змінюється рівень заряду акумуляторної системи протягом літньої доби. На ньому також нанесено мінімально допустимий SOC і резервний рівень. SOC зростає в години заряду і падає в години розряду — це видно з добової динаміки. При цьому резервний рівень 55% в нормальному режимі не порушується, і акумулятор завжди готовий до аварійного живлення.

Графік підтверджує головне — EMS не витрачає весь ресурс BESS на ціновий арбітраж. Частина енергії завжди зарезервована під критичне навантаження дата-центру.

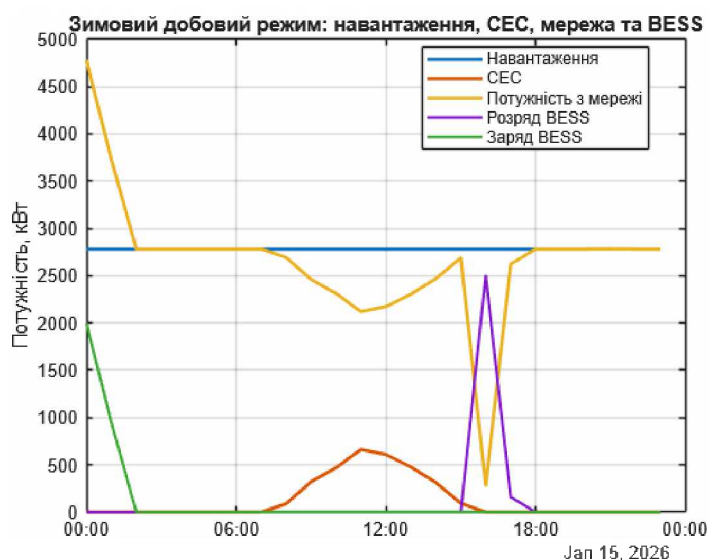


Рисунок 4.5 — Добовий режим у зимовий день

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5

Арк.

57

Графік показує роботу системи в зимовий день — коли сонячна генерація значно нижча ніж влітку.

Через коротку тривалість світлового дня і слабку інсоляцію більша частина навантаження лягає на зовнішню мережу. СЕС дає лише часткове зменшення закупівлі, а BESS в нормальному режимі більше працює на тарифну оптимізацію і тримає аварійний резерв.

Графік підтверджує очевидне — взимку забезпечити автономію дата-центру тільки за рахунок СЕС неможливо. Зовнішня мережа і BESS/UPS залишаються обов'язковими елементами системи незалежно від сезону.

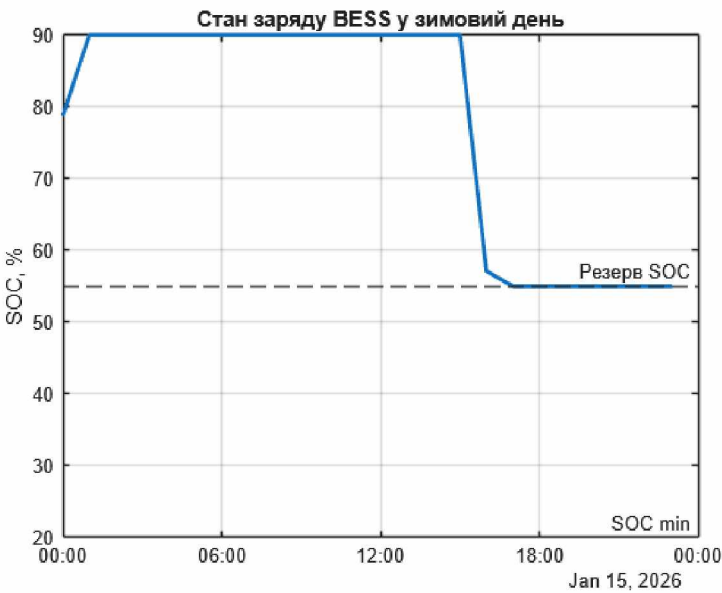


Рисунок 4.6 — SOC BESS у зимовий день

Графік показує динаміку SOC акумуляторної системи протягом зимової доби.

Заряд від СЕС взимку мінімальний — тому SOC переважно підтримується алгоритмом збереження резерву і зарядом від мережі в дешеві години.

Такий режим роботи підтверджує просту річ — BESS треба розглядати насамперед як резерв для критичних навантажень, а не як джерело повної добової автономії дата-центру.

4.5. Алгоритм EMS

Система EMS у моделі працює за чітким пріоритетом — спочатку використовується енергія СЕС, і при цьому завжди зберігається аварійний резерв BESS. Алгоритм розгортається в такій послідовності:

- сонячна генерація в першу чергу покриває поточне навантаження дата-центру;
- якщо СЕС виробляє більше ніж потрібно — надлишок іде на заряд BESS;
- якщо BESS досягла SOC_max — надлишкова генерація обмежується через Zero Export;
- в дешеві години РДН допускається додатковий заряд BESS від мережі;
- в дорогі години РДН BESS може частково розряджатись щоб скоротити закупівлю з мережі;
- нижче рівня SOC_reserve акумулятор в нормальному режимі не розряджається — ця енергія тримається під аварію;
- якщо зовнішня мережа зникає — некритичні споживачі відключаються, а BESS разом із СЕС підтримують критичне ІТ-навантаження.

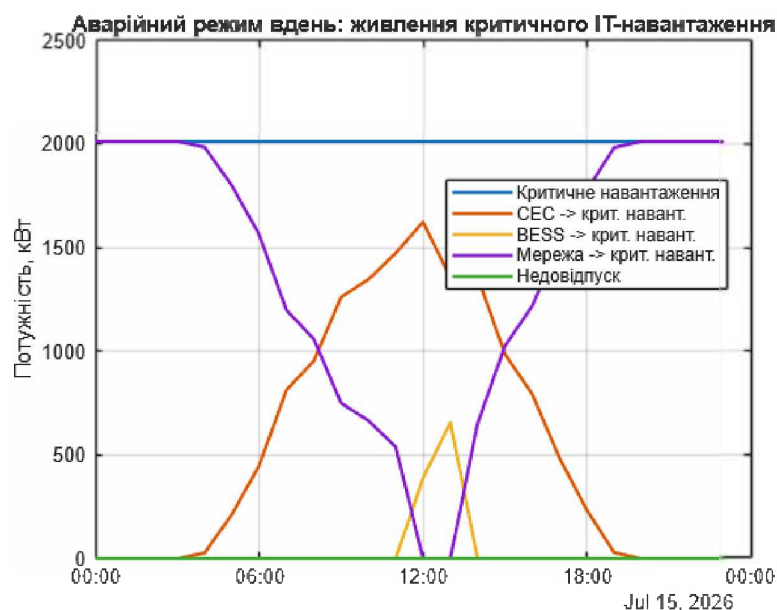


Рисунок 4.7 — Аварійний режим вдень

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5

Арк.

59

Графік моделює аварійний сценарій — зникнення зовнішньої мережі з 12:00 до 14:00 у літній день. Показано як в цей час розподіляється покриття критичного навантаження між CEC і BESS.

Вдень CEC бере на себе частину критичного навантаження, дефіцит закриває BESS. Некритичні споживачі в аварійному режимі одразу відключаються. Недовідпуску енергії в цьому сценарії немає — критичне ІТ-навантаження повністю забезпечене.

Графік підтверджує що денна аварія переноситься значно легше завдяки CEC — вона розвантажує акумулятори і підвищує стійкість живлення дата-центру в цілому.



Рисунок 4.8 — SOC при аварії вдень

Графік показує як змінюється SOC акумуляторної системи під час денного аварійного сценарію. Оскільки частину навантаження в цей час бере на себе CEC — BESS розряджається повільніше ніж в нічному аварійному сценарії. SOC не наближається до мінімально допустимого рівня, критичне навантаження залишається повністю забезпеченим.

Графік підтверджує ефективність денного аварійного режиму — сонячна генерація продовжує підтримувати критичну шину і суттєво продовжує час автономної роботи системи при острівному режимі через BESS/UPS.

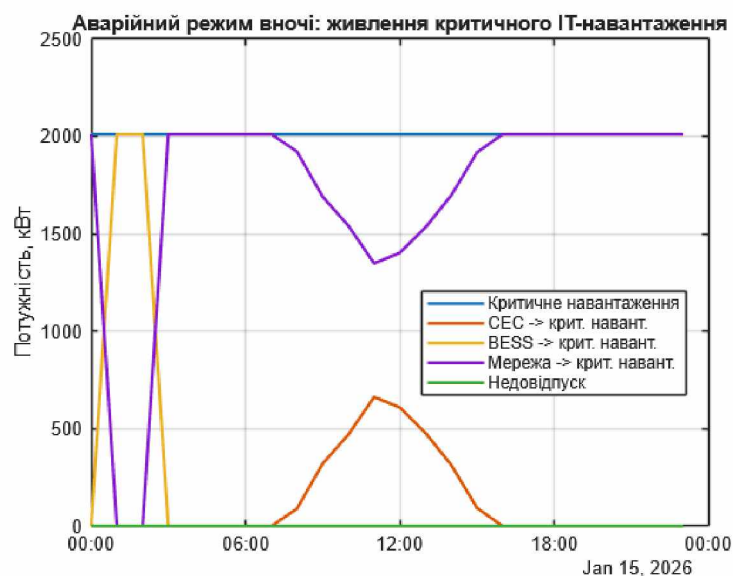


Рисунок 4.9 — Аварійний режим вночі

Графік моделює найважчий сценарій — зникнення мережі з 01:00 до 03:00 у зимову ніч. СЕС вночі не працює, тому все критичне ІТ-навантаження 2010 кВт лягає виключно на BESS/UPS.

Потужність з мережі нульова, СЕС участі не бере — акумулятори працюють самостійно весь аварійний період.

Саме цей сценарій є визначальним для вибору ємності акумуляторної системи. Якщо BESS впорується з нічною аварією — денні сценарії проходять із значно більшим запасом завдяки підтримці СЕС.



Рисунок 4.10 — SOC при аварії вночі

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5

Арк.

61

Графік показує значно глибше падіння SOC порівняно з денним аварійним сценарієм — що логічно, бо вся енергія береться виключно з акумуляторів. За двогодинної аварії SOC знижується, але до мінімального допустимого рівня 20% не доходить. Це означає що обрана ємність 8 МВт·год має достатній запас для покриття критичного ІТ-навантаження протягом заданого аварійного інтервалу.

Результат підтверджує правильність вибору — BESS/UPS справляється з роллю основного джерела короткочасного резервування критичних навантажень дата-центру навіть у найважчому нічному сценарії.

4.6. Економічна модель

Економічний ефект рахується через порівняння двох варіантів: базового — коли весь дата-центр живиться виключно від зовнішньої мережі — і проєктного, коли частину енергії закриває CEC разом із BESS.

$$C_{base} = \sum P_{load}(t) \cdot c(t) \cdot \Delta t.$$

$$C_{project} = \sum P_{grid}(t) \cdot c(t) \cdot \Delta t.$$

$$S_{gross} = C_{base} - C_{project}.$$

$$S_{net} = S_{gross} - C_{O\&M}.$$

$$T_{payback} = CAPEX / S_{net}.$$

У моделі розглянуто три сценарії середньої ціни електроенергії на РДН України. Важливий момент — ціни прийнято як оптові індекси без ПДВ, тарифів на передачу і розподіл, небалансів та маржі постачальника. Тому для реального договору ці значення потрібно уточнювати за актуальними комерційними умовами.

Сценарій	Середня ціна, грн/кВт·год	Валова економія, млн грн/рік	Чиста економія, млн грн/рік	Простий строк окупності, років
Мінімальний РДН	3,95	15,88	14,64	8,48
Середній РДН	5,07	20,38	19,14	6,49
Максимальний РДН	10,05	40,41	39,16	3,17

Таблиця 4.1 — Економічні результати моделювання проєкту за різними сценаріями ціни РДН

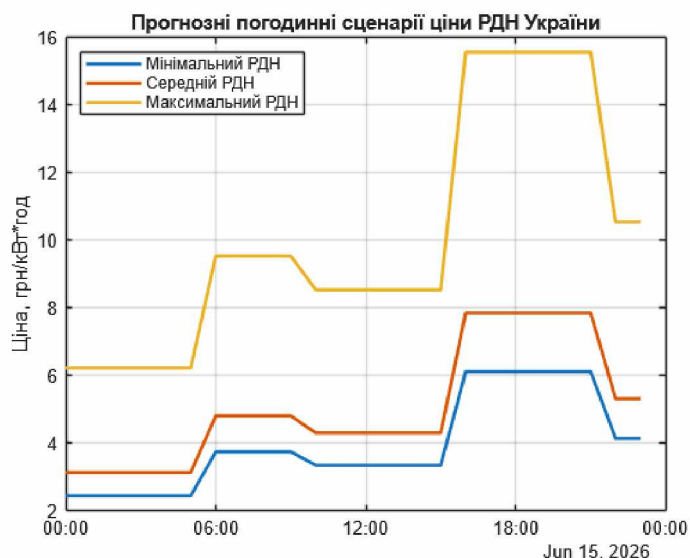


Рисунок 4.11 — Прогнозні погодинні сценарії ціни РДН України

Графік показує три добові профілі ціни електроенергії — мінімальний, середній і максимальний сценарії. Форма кривої в усіх однакова, різняться лише середній рівень ціни. Вночі електроенергія дешевша, у вечірній пік — дорожча. Саме цю різницю EMS використовує для економічного арбітражу: заряджає BESS в дешеві години і частково розряджає в дорогі.

Графік обґрунтовує чому важливо враховувати погодинну вартість електроенергії — однакова кількість зекономлених кВт·год в різні години доби дає різний грошовий ефект.

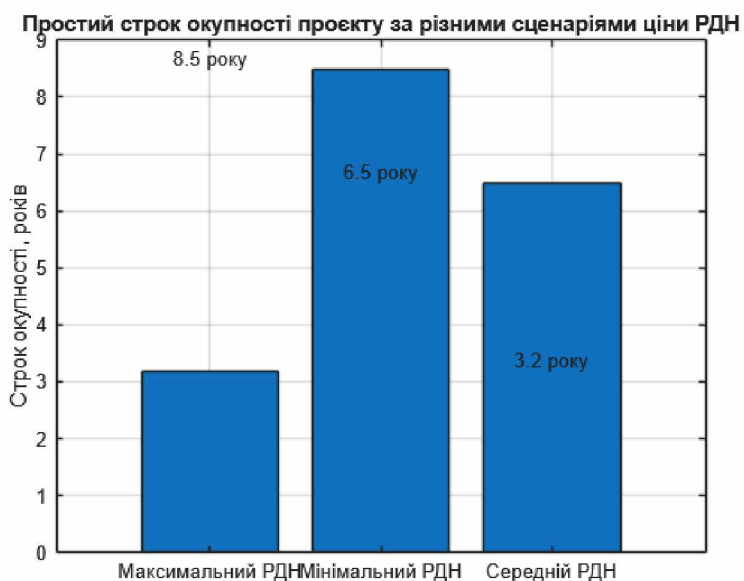


Рисунок 4.12 — Окупність за сценаріями тарифу

Стовпчиковий графік порівнює строк окупності проекту для трьох тарифних сценаріїв. При мінімальній ціні 3,95 грн/кВт·год окупність розтягується до 8,48 року. Середній сценарій — 5,07 грн/кВт·год — дає 6,49 року. При високій ціні 10,05 грн/кВт·год проект окупається вже за 3,17 року.

Графік наочно показує наскільки економіка проекту чутлива до тарифу на електроенергію. Чим вища ринкова ціна — тим швидше СЕС із BESS повертає вкладені кошти.

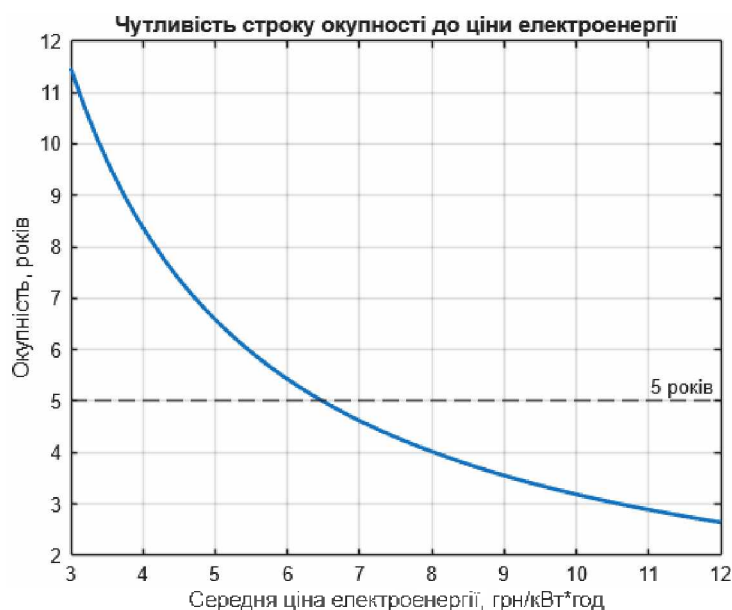


Рисунок 4.13 — Чутливість окупності до ціни електроенергії

Графік показує як змінюється простий строк окупності при зростанні середньої ціни електроенергії в діапазоні 3–12 грн/кВт·год.

Крива спадає — чим вища ціна, тим більша річна економія і тим швидше повертаються інвестиції. На графіку додатково нанесено горизонтальну позначку 5 років як орієнтир економічної привабливості.

Цей графік зручно використовувати для техніко-економічного обґрунтування — він одразу показує при яких ринкових умовах проєкт стає найвигіднішим.

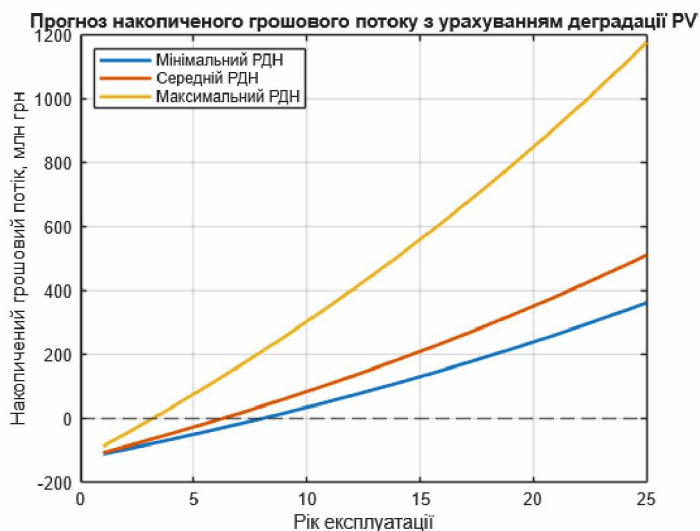


Рисунок 4.14 — Прогноз накопиченого грошового потоку

Графік показує накопичений грошовий потік проєкту протягом усього життєвого циклу — з урахуванням початкових інвестицій, щорічної економії, деградації модулів, зростання ціни електроенергії і витрат на обслуговування.

На старті крива йде в мінус через CAPEX. З кожним роком накопичений потік зростає, і в момент перетину з нульовою лінією проєкт виходить на окупність.

Графік дає змогу оцінити не просто коли повернуться гроші, а й наскільки система фінансово вигідна на горизонті всього терміну експлуатації СЕС.

Висновок до розділу 4

У четвертому розділі виконано математичне моделювання режимів роботи гібридної системи електропостачання в середовищі MATLAB Live Script. Модель дозволила дослідити погодинний енергетичний баланс протягом року і перевірити надійність алгоритмів EMS.

За результатами моделювання зроблено такі висновки:

Енергетичний баланс. СЕС потужністю 3 МВт генерує близько 3,456 ГВт·год на рік і покриває 13,2% загального річного споживання дата-центру в 26,2 ГВт·год.

Оптимізація і резервування. BESS ємністю 8 МВт·год одночасно вирішує дві задачі — оптимізує закупівлю електроенергії через ціновий арбітраж і тримає аварійний резерв. EMS жорстко утримує рівень заряду не нижче 55% у нормальному режимі — акумулятор завжди готовий до аварії.

Надійність в аварійних режимах. Моделювання підтвердило що критичне ІТ-навантаження 2010 кВт забезпечується в будь-якому сценарії. Вдень це спільна робота СЕС і BESS, вночі — виключно акумулятори. Навіть у найважчому нічному сценарії SOC не просідає нижче критичного мінімуму 20%.

Економічна доцільність. Строк окупності сильно залежить від тарифу на електроенергію. При мінімальному — 3,95 грн/кВт·год — це 8,48 року. При середньому — 6,49 року. При максимальному 10,05 грн/кВт·год проект окупається вже за 3,17 року.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено конкретну інженерну задачу — розроблено і обґрунтовано проєкт гібридної сонячної електростанції з системою накопичення енергії для надійного живлення малого дата-центру. Ось що зроблено по кожному напрямку:

Аналіз об'єкта: дата-центр відноситься до особливої групи першої категорії надійності. Загальна розрахункова потужність — 2990,8 кВт, з яких 2010 кВт це критична ІТ-інфраструктура що не терпить жодного переривання. Річне споживання — 26,2 ГВт·год, PUE = 1,49.

Вибір обладнання: обрано гібридну конфігурацію — СЕС плюс зовнішня мережа плюс BESS/UPS. До встановлення прийнято 4480 панелей Trina Solar Vertex 670W, 14 інверторів Huawei SUN2000-215KTL-H0 і 4 акумуляторні контейнери Huawei LUNA2000-2.0MWH загальною ємністю 8 МВт·год.

Електротехнічні розрахунки: розроблено структурну і принципову однолінійну схеми. Розраховано перерізи кабелів — DC кабель H1Z2Z2-K 6 мм² і АС лінії — з дотриманням допустимих втрат напруги: не більше 1,5% для DC і 3% для АС. Підібрано апарати захисту.

Моделювання: цифрова модель у MATLAB Live Script підтвердила працездатність всіх прийнятих рішень. EMS утримує резервний рівень заряду не нижче 55% і грамотно розподіляє потоки енергії. СЕС генерує 3,456 ГВт·год на рік — 13,2% від потреб об'єкта. BESS забезпечує до 2,65 години автономії для критичного навантаження.

Підсумок простий — система технічно надійна, економічно вигідна і реально вирішує задачу безперебійного живлення дата-центру за рахунок відновлюваної енергії.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Гончарова М.О.			Висновки		Літ.	Арк.
Перевірів		Пересулько І.І.						Акрушіє
Н. Контр.		Пересулько І.І.					67	1
Затвердж.		Пересулько І.І.					КНУ гр. ЕЕМ-22-2	

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Telecommunications Industry Association (TIA). *Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers (ANSI/TIA-942)* [Електронний ресурс]. — TIA, 2017. — Режим доступу: <https://tiaonline.org/standards>
2. Siemens. *Application Manual: Power Distribution in Data Centres* [Електронний ресурс]. — Siemens AG, 2018. — URL: <https://new.siemens.com/global/en/markets/data-centers.html> (дата звернення: 19.05.2026).
3. ASHRAE TC 9.9. *Data Center Power Equipment Thermal Guidelines and Best Practices* [Електронний ресурс] // ASHRAE. — 2016. — Режим доступу: <https://www.ashrae.org/technical-resources>
4. ABB Group. *Uninterruptible Power Supply for Data Centers* [Електронний ресурс]. — ABB, 2021. — URL: <https://new.abb.com/data-centers> (дата звернення: 19.05.2026).
5. ДБН В.2.5-23:2010. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення [Електронний ресурс] // Мінрегіонбуд України. — Київ, 2010. — URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail (дата звернення: 19.05.2026).
6. The Green Grid. *PUE: A Comprehensive Examination of the Metric* [Електронний ресурс] // The Green Grid Association. — 2012. — Режим доступу: <https://www.thegreengrid.org/en/resources>

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Список використаних джерел	Літ.	Арк.	Акрушіє
Розробив		Гончарова М.О.						
Перевірів		Пересунько І.І.					68	4
Н. Контр.		Пересунько І.І.				КНУ гр. ЕЕМ-22-2		
Затвердж.		Пересунько І.І.						

7. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Затверджено наказом Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476 [Електронний ресурс] // Офіційний вебсайт Міністерства енергетики України. — 2017. — URL: <https://mev.gov.ua> (дата звернення: 19.05.2026).

8. European Commission's Science and Knowledge Service. *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)* [Електронний ресурс]. — Joint Research Centre, 2024. — URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis_en (дата звернення: 19.05.2026).

9. Smets A. et al. *Solar Energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion* [Електронний ресурс]. — UIT Cambridge, 2016. — 412 p. — Режим доступу: <https://www.tudelft.nl/opencourseware>

10. Trina Solar. *Vertex Monocrystalline Ultra-High Power Modules. TSM-DE20 Datasheet* [Електронний ресурс]. — Trina Solar Co., Ltd., 2023. — URL: <https://www.trinasolar.com/en-glb/resources/downloads> (дата звернення: 19.05.2026).

11. Huawei Technologies Co., Ltd. *FusionSolar Smart PV Solution: String Inverter Technical Specification* [Електронний ресурс]. — Huawei, 2022. — Режим доступу: <https://solar.huawei.com/ua>

12. National Renewable Energy Laboratory (NREL). *Grid-Scale Battery Storage: Frequently Asked Questions* [Електронний ресурс]. — U.S. Department of Energy, 2021. — 28 p. — URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/74426.pdf>

13. Asian Development Bank (ADB). *Handbook on Battery Energy Storage System* [Електронний ресурс]. — ADB, 2018. — 144 p. — URL: <https://www.adb.org/publications/handbook-battery-energy-storage-system> (дата звернення: 19.05.2026).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

14. Gonçalves A. et al. Optimal Sizing of PV and Battery Energy Storage Systems for Critical Infrastructures // *Energies*. — 2023. — Vol. 16, No. 4. — P. 1792 [Електронний ресурс]. — DOI: 10.3390/en16041792

15. Кабельний завод «Енергопром». *Кабелі силові з мідними жилами ВВГ, ВВГнг, ВВГнг-LS. Технічні характеристики та провідність* [Електронний ресурс]. — Офіційний каталог, 2024. — Режим доступу: <https://energoprom.ua/catalog>

16. ДСТУ ІЕС 60364-5-52:2015. Електричні установки будівель. Частина 5-52. Вибір і монтаж електрообладнання. Проводка (ІЕС 60364-5-52:2009, IDT) [Електронний ресурс]. — ДП «УкрНДНЦ», 2016. — URL: <https://online.budstandart.com> (дата звернення: 19.05.2026).

17. Schneider Electric. *Industrial Circuit Breakers and Protection Relays. Compact NSX & Acti9 Catalogue* [Електронний ресурс]. — Schneider Electric, 2023. — Режим доступу: <https://www.se.com/ua>

18. ЕТІ Україна. *Запобіжники та автоматичні вимикачі промислового призначення. Серія ETIBREAK* [Електронний ресурс] // Технічний каталог обладнання ЕТІ. — 2024. — URL: <https://eti.ua> (дата звернення: 19.05.2026).

19. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). *Про встановлення тарифів на електроенергію для промислових споживачів* [Електронний ресурс] // Постанови НКРЕКП. — 2025. — URL: <https://www.nerc.gov.ua> (дата звернення: 19.05.2026).

20. Державна служба статистики України. *Енергетичний баланс України за звітний період* // Офіційний вебсайт держкомстату. — 2025. — Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua>

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

21. International Energy Agency (IEA). *Greenhouse Gas Emissions from Energy Data and Analytics* [Електронний ресурс]. — Paris: IEA, 2023. — URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics> (дата звернення: 19.05.2026).

22. ДСТУ EN 62548:2019. Фотоелектричні масиви. Вимоги до проектування (EN 62548:2016, IDT; IEC 62548:2016, MOD) [Електронний ресурс]. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. — Режим доступу: <https://online.budstandart.com>

23. Eaton Corporation. *Power Quality and Backup Power Solutions for Data Centers Guide* [Електронний ресурс]. — Eaton, 2022. — URL: <https://www.eaton.com/datacenter> (дата звернення: 19.05.2026).

24. Баптиданов Л. М., Тарасов В. І. *Електропостачання промислових підприємств і цивільних споруд*: підручник. — Київ: Вища школа, 2011. — 385 с.

25. Киншт Н. В. *Методи розрахунку та оптимізації локальних систем електропостачання з відновлюваними джерелами енергії* // Технічна електродинаміка. — 2019. — № 3. — С. 45–52.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71