

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(повне найменування вищого навчального закладу)

ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ

(назва факультету)

КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ І ФІЗИКИ

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

(рівень вищої освіти)

на тему «Підвищення надійності електропостачання приватних домогосподарств улаштуванням комбіновано системи електроживлення»

Виконав: студент 4 курсу групи 4ЕЛ
спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)

освітньо-
професійної Електротехніка та електротехнології.
програми (назва ОПП)

Федорчук С.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник Івченко В.В.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Мешков Ю.Є .
(прізвище та ініціали)

Хмельницький – 2026 р.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота на тему «Підвищення надійності електропостачання приватних домогосподарств улаштуванням комбінованої системи електроживлення» включає в себе пояснювальну записку та графічну частину.

Пояснювальна записка містить 72 сторінки формату А4, 15 рисунків, 25 таблиць, 20 використаних джерел.

Ключові слова: електропостачання, електроживлення, генератор, акумуляторна батарея, інвертор, сонячна панель.

Кваліфікаційна робота присвячена моделюванню та дослідженню електропостачання приватного домогосподарства від різних джерел електричної енергії, що використовуються як окремо, так і комбіновано.

Здійснено аналіз та розглянуто типи джерел електропостачання для приватних домогосподарств.

Розроблено систему комбінованого електропостачання домогосподарства.

В роботі розглянуто комплекс заходів для попередження нещасних випадків на робочому місці, забезпечення пожежної безпеки.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА.....	5
1.1 Огляд джерел електроживлення приватних домогосподарств....	5
1.2 Використання генератора з двигуном внутрішнього згоряння в якості резервного джерела живлення	7
1.3 Використання накопичувачів електричної енергії в якості резервного електрозабезпечення.....	10
1.4 Фотовольтаїчні системи в приватних домогосподарствах.....	13
1.5 Висновки.....	19
2 МЕТОДИЧНА ЧАСТИНА.....	21
2.1 Методика визначення необхідної потужності зарезервованої мережі.....	21
2.2 Методика визначення мінімально необхідної потужності генератора.....	24
2.3 Методика визначення параметрів акумуляторних батарей.....	25
2.4 Методика розрахунку фотовольтаїки.....	27
2.5 Методика розрахунків економічних показників експлуатації комбінованої системи електропостачання.....	32
2.6 Висновки.....	36
3 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА.....	37
3.1 Розподіл мережі домогосподарства.....	37
3.2 Вибір гібридного інвертора.....	38
3.3 Вибір акумуляторної батареї.....	42
3.4 Розрахунок і моделювання роботи фотовольтаїки.....	45
3.5 Розрахунок потужності генератора з двигуном внутрішнього згоряння.....	52
3.6 Розробка схеми комбінованого електроживлення.....	54

3.7 Економічні показники розробленої системи комбінованого електроживлення.....	58
3.8 Висновки.....	62
4 ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА.....	64
4.1 Охорона праці.....	64
4.2 Пожежна безпека.....	66
4.3 Висновки.....	67
ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	71

ВСТУП

Сучасний побут насичений різного роду електроприладами. Одним з основних «стовпів», на яких тримається рівень добробуту населення є забезпечення електроенергією. Від електропостачання безпосередньо залежить забезпечення потреб людини в комфортних температурних умовах, приготуванні та збереженні їжі, в засобах комунікації, роботи та розваг.

Актуальність теми дослідження випливає з необхідності забезпечення максимального задоволення в потребах електроенергією в побуті при можливих збоях централізованого електропостачання. Розгляд різних видів джерел електроенергії і визначення оптимального їх комбінування дозволить підвищити надійність електрозабезпечення та зменшення споживання електроенергії від енергопостачальної організації.

Метою кваліфікаційної роботи є побудова моделі комбінованої системи електропостачання приватного домогосподарства.

Об'єктом дослідження є джерела енергії для домогосподарства.

Предмет дослідження – використання різних видів джерел в забезпеченні електроенергією домогосподарств.

Задачі дослідження:

- Проаналізувати можливі варіанти використання різних джерел електроенергії в побуті;
- Розглянути сучасне обладнання для побутового використання, що генерує та накопичує електроенергію;
- Визначити оптимальну модель конфігурації комбінованої системи електроживлення домогосподарства.

Практичне значення результатів дослідження – можливість застосування отриманих результатів при проектуванні мереж електроживлення домогосподарств з підвищеним рівнем надійності.

На основі отриманих результатів дослідження розроблено комбіновану систему електроживлення приватного домогосподарства.

1 ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА

1.1 Огляд джерел електроживлення приватних домогосподарств

В Україні всі приватні домогосподарства мають можливість отримувати електроенергію від об'єднаної енергетичної системи. Енергосистема є надійним постачальником електроенергії за оптимальної ціни. В той же час, існує можливість тривалих знеструмлень електромережі, що в сучасному побуті призводить до тимчасового, але значного зниження рівня добробуту. В таких випадках доповнення електромережі домогосподарства приладами по накопиченню та, або приладами генерації електроенергії дозволяє нівелювати незручності пов'язані з відключеннями електроенергії в централізованій мережі. Додаткові джерела електроенергії повинні бути сумісними з централізованим електропостачанням, бути безпечними, по можливості мати максимально можливий автоматичний режим роботи.

Важливою характеристикою індивідуальних джерел електропостачання є якість електроенергії. Холодильне обладнання, газові котли, насосні станції водопостачання потребують змінну напругу із справжньою синусоїдальною формою. Враховуючи, що це обладнання відноситься до зарезервованої групи, резервні джерела електроенергії повинні видавати справжню синусоїду.

Для резервного живлення домогосподарств розповсюдженими є електрогенератори з двигуном внутрішнього згоряння. Побутові електрогенератори виготовляють з бензиновими, дизельними та газовими двигунами. Ресурс якісних побутових генераторів, при своєчасному обслуговуванні сягає не менше 2000 мото-год. Освоєно виробництво когенераційних установок малої потужності – від 10 кВт по електричній енергії. Вони оснащені поршневыми двигунами з рідинним охолодженням, що дає можливість використовувати теплову енергію, що в звичайних генераторних установках втрачається, для опалення. При підключенні їх до

газової мережі відпадає потреба в періодичній заправці паливом. Даний тип енергоустановок більш відповідає умовам розсередженої електрогенерації.

Також широко розповсюдженим способом підвищення надійності електропостачання є використання акумуляторних накопичувачів електроенергії. Акумуляторні системи накопичення можуть працювати самостійно – підзаряджатися від централізованої електромережі, так і в комплексі з іншими джерелами електроенергії.

Все більше для електрогенерації використовуються джерела відновлюваної енергії. Широкого розповсюдження набуває використання фотовольтаїки для електрозабезпечення домогосподарств. Сонячні електростанції (СЕС) можуть бути побудовані на трьох видах інверторів: мережеві, автономні та гібридні. Мережеві інвертори набули широкого розповсюдження в зеленій електроенергетиці, але вони працюють тільки при наявності напруги в мережі – для підвищення надійності електропостачання не підходять. СЕС з автономними інверторами добре підходять для забезпечення електроживленням при відсутності централізованого електропостачання. Вони можуть працювати в комплексі з акумуляторними батареями (АБ), що продовжує час їхнього використання на періоди відсутності сонячного світла. Автономні СЕС можна використати для підвищення надійності електроживлення домогосподарства шляхом улаштування ручної або автоматичної комутації. СЕС із гібридним інвертором, додатково може взаємодіяти із централізованою мережею – підзаряджати АБ від неї або експортувати електроенергію до неї.

Також на ринку присутні вітрогенератори малої потужності, які придатні для використання у приватних домогосподарствах. Вітрогенератори мають вагомні недоліки, які сильно обмежують їх використання в домашніх господарствах. Вітрогенератори потребують вільного місця для установки, яка на обмеженій площі ділянки домогосподарства малоймовірна. Головним недоліком вітрогенераторів є створення шуму, що унеможливорює їх установку біля житлових будинків.

1.2 Використання генератора з двигуном внутрішнього згорання в якості резервного джерела живлення

Електрогенератор з рушієм від двигуна внутрішнього згорання (ДВС) є, за умови його своєчасного обслуговування та підтримки в робочому стані, надійним джерелом резервного електроживлення. Конструкція традиційного електрогенератора достатньо проста – рама, в якій закріплено двигун та альтернатор, що з'єднані напряму без трансмісії, паливний бак і панель управління та комутації. Традиційні електрогенератори мають частоту обертання 3000 хв^{-1} або 1500 хв^{-1} , щоб забезпечити частоту струму 50 Гц. Для виконання умови наявності справжньої синусоїди, електрогенератор має бути обладнано синхронним альтернатором, а для забезпечення стабільної напруги альтернатори обладнують автоматичними регуляторами напруги (AVR).

Найпростіші електрогенератори обладнані карбюраторною системою приготування робочої суміші, працюють на бензині і потребують ручного вмикання та вимикання пускового пристрою, незалежно від типу запуску двигуна – електростартерного чи ручного. Електрична потужність бензинових генераторів знаходиться в діапазоні від 1 кВт до 15 кВт.

Дизельні генератори мають більш складну систему живлення. Запуск тільки електростартером. Мінімальна потужність дизельних генераторів від 5 кВт, максимальна перевершує потреби домогосподарств – вимірюється сотнями кіловат. Продвинуті моделі генераторів можуть бути обладнані системами автоматичного запуску. Дизельні генератори мають більш тривалий термін служби, ніж бензинові, особливо потужні генератори з частотою обертання 1500 хв^{-1} та рідинним охолодженням. Дизельні генератори мають менші питомі витрати пального, порівняно з бензиновими.

Газові генератори можуть працювати на природньому газу або пропані. Потужність побутових газових генераторів від 8 кВт до 16 кВт. Газові генератори інтегруються в системи з автоматичним введенням резерву. При підключенні генератора до магістрального газу відпадає потреба в періодичній

заправці паливом. Двигуни газових генераторів є довговічними, потребують рідшого технічного обслуговування, ніж бензинові. Недоліком газових генераторів є підвищена небезпека та необхідність узгодження підключення з газовими службами та їх періодичним обслуговуванням газових мереж.

Різноманітністю генераторів з ДВС є інверторні генератори. Інверторні генератори мають додатково у своєму складі вимрямляч та інвертор. ДВС генератора може змінювати оберти двигуна в залежності від навантаження – частота вихідного струму повністю залежить від інвертора. Інверторний генератор є більш економічним при часткових навантаженнях – він переходить на економічний режим зменшених обертів двигуна. Недоліком є більш складна, і тому менш надійна конструкція та, як наслідок, він має вищу ціну.

Таблиця 1.1 – Споживчі характеристики побутових електрогенераторів

Показник	Бензинові генератори	Дизельні генератори
Питома витрата пального, л/кВт·год.	0,5 – 0,7	0,3 – 0,4
Ресурс, Мото-год.	500 – 3000	4 000 – 40 000
Рівень шуму (без кожуха), дБ	60-75	70-90
Портативність	Висока	Низька
Складність обслуговування	Низька	Середня
Запуск за низької температури	Легкий	Складний

Побутові генератори за конструкцією можуть бути однофазними та трифазними. Для домогосподарств доцільно використовувати однофазні генератори, незалежно від підключення до розподільної компанії – однофазного чи трифазного. Трифазні генератори потребують рівномірного розподілення навантаження по фазах [А7], що в приватному домогосподарстві є важко досяжним.

Підключення індивідуальних генераторів повинно бути безпечним та надійним:

- Користувач має бути убезпеченим від дотику з оголеними контактами, що знаходяться під напругою;
- При заживленні домашньої мережі від генератора, домогосподарство має бути від'єднаним від мережі електропостачальної організації.
- Має повністю виключатися ймовірність підключення генератора до струму від мережі, щоб не вивести його з ладу.

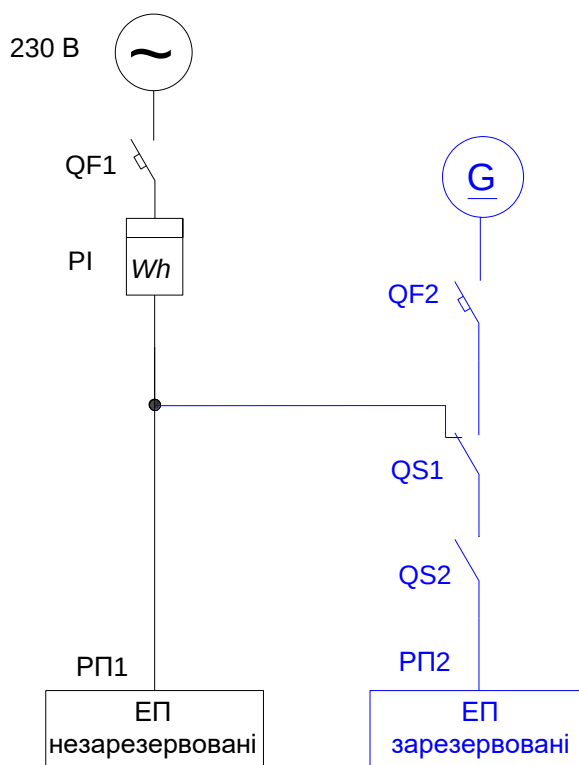


Рисунок 1.1 – Схема підключення побутового генератора до мережі: - чорний колір – незарезервована частина мережі; - синій колір – зарезервована частина мережі; QF1 – ввідний автоматичний вимикач мережі домогосподарства; QF2 – автоматичний вимикач захисту генератора; QS1 – перемикач «мережа – генератор»; QS2 – вимикач навантаження зарезервованої мережі; PI – лічильник електричної енергії енергопостачальника; G – генератор; РП1 – розподільний пункт незарезервованої частини мережі; РП2 – розподільний пункт зарезервованої частини мережі;

1.3 Використання накопичувачів електричної енергії в якості резервного електрозабезпечення

Використання акумуляторних батарей (АБ) має розповсюджену практику для резервування електроживлення. Для повноцінного використання резервного живлення на АБ, необхідне автоматичне їх заряджання при появі напруги в централізованій мережі та перехід на живлення від АБ при знеструмленні. Окрім АБ, система резервування має включати контролер заряджання АБ та інвертор (рис.1.2), що в сукупності складає джерело безперебійного живлення (ДБЖ).

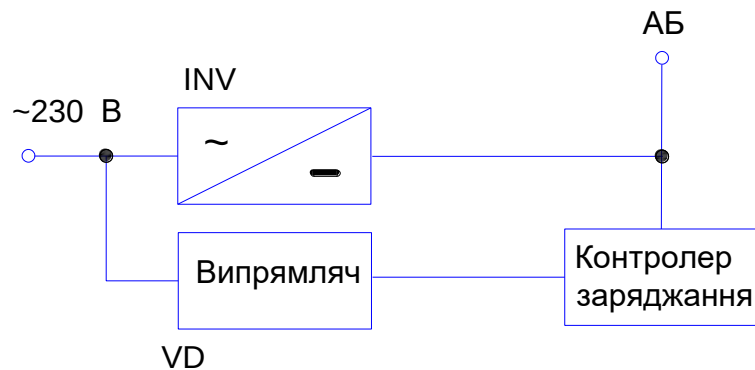


Рисунок 1.2 – Структурна схема ДБЖ

Для резервного живлення домогосподарства підходять ДБЖ із зовнішніми АБ – вони мають значну потужність та дозволяють змінювати обсяги накопичуваної електроенергії шляхом вибору необхідної ємності АБ. Для більшої потужності ДБЖ з метою зменшення струму АБ застосовують вищу напругу АБ.

Таблиця 1.2 - Типові напруги АБ, що використовуються в ДБЖ

Напруга АБ, В	Потужність навантаження
12	До 1 – 2,5 кВт
24	До 3 - 4 кВт
48	До 8 – 15 кВт

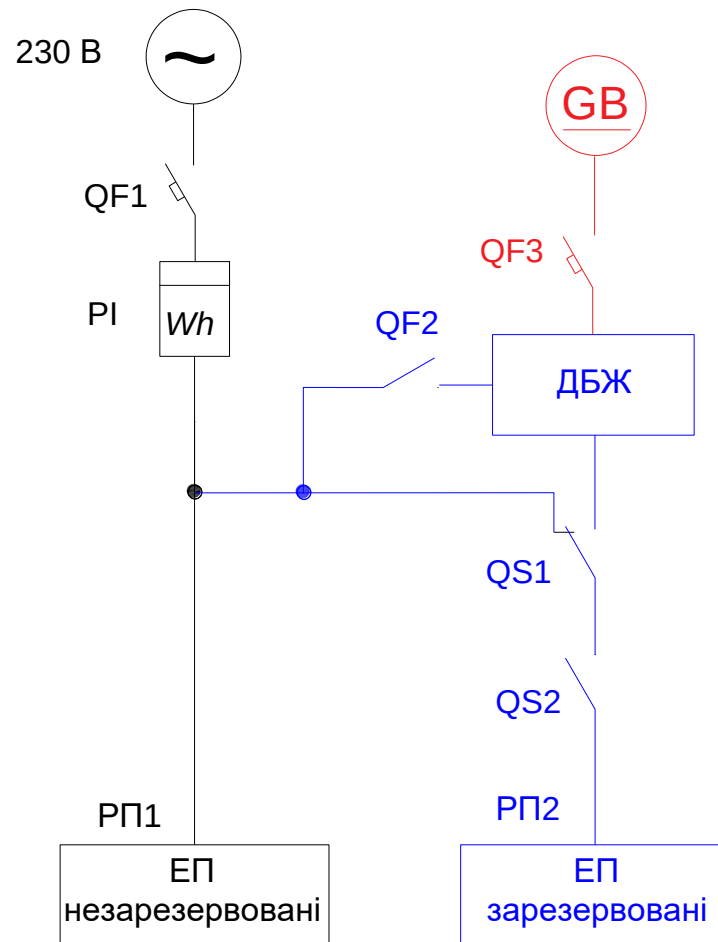


Рисунок 1.3 – Схема підключення ДБЖ до мережі:

- чорний колір – незарезервована частина мережі; - синій колір – зарезервована частина мережі; - червоний колір – постійний струм; QF1 – ввідний автоматичний вимикач мережі домогосподарства; F2 – вимикач ДБЖ від мережі; QF3 – автоматичний вимикач захисту АБ; QS1 – перемикач «ручного режиму мережа – інвертор»; QS2 – вимикач навантаження зарезервованої мережі; PI – лічильник електричної енергії енергопостачальника; GB – акумуляторна батарея; ДБЖ – джерело безперебійного живлення; РП1 – розподільний пункт незарезервованої частини мережі; РП2 – розподільний пункт зарезервованої частини мережі;

Мережа домогосподарства має забезпечувати варіанти живлення зарезервованої мережі як від ДБЖ так і напряму від централізованої мережі для можливості ремонту та обслуговування ДБЖ (рис. 1.3).

В ДБЖ можуть бути застосовані АБ із свинцево-кислотних акумуляторів або лужних. Найдешевшим варіантом є застосування тягових свинцево-кислотних АБ з рідким електролітом (FLA), здатних переносити глибокі розряди. Їх недоліком є непридатність до використання в приміщеннях через виділення газів. Продвинутими типами є свинцево-кислотні акумулятори з електролітом загущеним до гелевого стану (GEL) та з просоченими електролітом сепараторами з мікропористого скловолокна (AGM) – вони здатні працювати в герметичних корпусах [13]. Загальним недоліком свинцево-кислотних АБ є низькі струми заряджання та віддачі, а також невисокий ККД. При тривалих знеструмленнях та коротких періодах подачі електроенергії свинцево-кислотні АБ не встигають зарядитися. Нормальний струм заряджання кислотних АБ становить 0,1С, що з врахуванням ефективності АБ 70 – 80 %, час повної зарядки може сягати 14 – 16 год.

Широкого розповсюдження в акумуляторних накопичувачах енергії набули літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) акумулятори. Час повного заряджання LiFePO_4 становить 2 – 3 год., стійкі до глибокого розряду, не мають ефекту пам'яті [16]. Для тривалого строку служби, LiFePO_4 АБ оснащуються електронними контролерами управління (BMS-плата, Master BMS), що моніторить струм і рівень заряду, струм і рівень розряду, температуру та проводить балансування комірок АБ.

В роботі ДБЖ має власну потужність споживання, в залежності від моделі 20 – 50 Вт. Фактор власного споживання знижує ефективність акумуляторних накопичувачів та має бути враховано при виборі ємності АБ.

Таблиця 1.3 – Споживчі характеристики акумуляторів

Критерії	FLA	AGM	GEL	LiFePO ₄
Вартість	100%	150%	170%	350%
Термін служби, цикли	300 – 500	500 – 800	700-1200	3000-6000
Термін служби, років	2 – 4	3 – 5	4 – 7	10 – 15
Ефективність, %	70 – 80	80 – 85	80 – 85	95 – 98
Обслуговування	Потрібне	Непотрібне	Непотрібне	Непотрібне
Діапазон робочих температур	-10..+45°C	-15..+50°C	-15..+50°C	-20..+60°C Заряд $\geq 0^\circ\text{C}$
Пікова струмовіддача	До 5С	До 5С	До 3С	До 3С
Типовий зарядний струм	0,1С	0,1С	0,1С	0,2..0,5С

1.4 Фотовольтаїчні системи в приватних домогосподарствах

Історія фотовольтаїчних елементів бере свій початок з першої половини 19-го століття. В 1839 році фізиком Беккерелем було виявлено генерацію електричного струму під впливом світла деякими елементами. У 1883 році винахідником Фріттсом в США було створено перший прототип фотоелемента з ефективністю 1%. В 1946 році інженером Расселом запатентованому кремнієвий сонячний елемент, а в 1954 році лабораторіями телефонної компанії Bell Labs створено першу сонячну батарею придатну для практичного використання – вона мала ефективність біля 6% . В 1958 році було запущено перший супутник із сонячними панелями. У 1963 році розпочато масове виробництво сонячних панелей. Наукові та технологічні досягнення сприяли тому, що сонячні елементи стали дешевшими – з 1980 року по 2018 вони подешевшали на 99%. Сонячна електроенергетика пройшла шлях від застосування у високотехнологічних галузях до широкого застосування у народному господарстві.

Сонячна електростанція має в своєму складі основні складові – масив сонячних панелей, контролер сонячних панелей, інвертор.

Найбільшого розповсюдження в даний час набули кремнієві сонячні панелі. Їхнє співвідношення ціни, якості та споживчих характеристик сприяють поширенню в народному господарстві. Ефективність монокристалічних панелей масового виробництва досягає 21 – 23 %, виробники дають гарантію 15 – 25 років на матеріали та гарантують 30-ти річний термін по збереженню електричної потужності панелі на рівні 86 – 87 % (рис. 1.4).

Quality Guarantee



Рисунок 1.4 – Деградація сонячних панелей HiMAX SP640M-78H

Для ефективної роботи сонячних панелей контролер сонячних панелей повинен підбирати оптимальне співвідношення напруги та струму, добуток яких забезпечать максимальну потужність (рис. 1.5).

Для ефективного використання сонячних панелей сучасні контролери сонячних панелей відслідковують точку максимальної потужності панелей (MPPT).

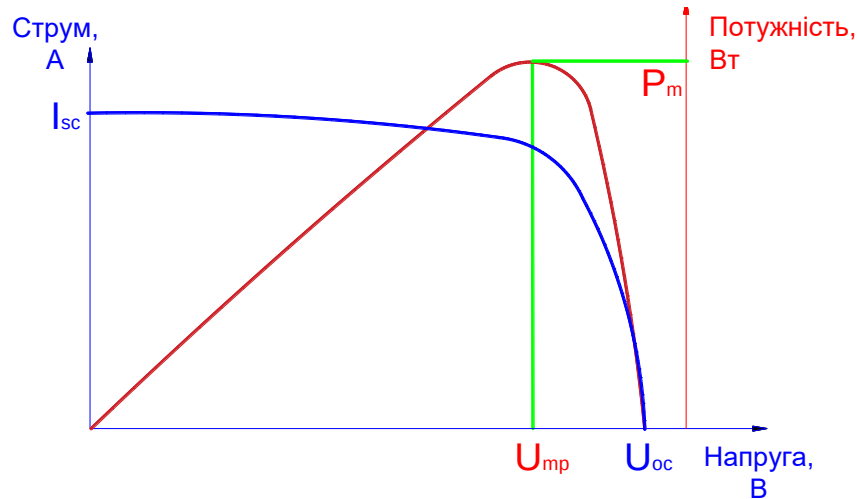


Рисунок 1.5 – Вольт-амперна характеристика та потужність сонячної панелі

Завдяки державній підтримці «зеленої електроенергії», в Україні сонячна електроенергетика отримала поштовх в розбудові мережевих сонячних електростанцій. Вони по суті є комерційними проектами, що приносять дохід, але вони працюють лише синхронно з централізованою електричною мережею. Конструкція мережевих інверторів не передбачає використання систем накопичення електроенергії, і як наслідок, при знеструмленні централізованої мережі, потенційна електроенергія сонячних панелей втрачається. З огляду на неможливість підвищити надійність електропостачання домогосподарства, мережеві СЕС не відповідають умовам дослідження даної роботи.

Без синхронізації з мережею можуть працювати автономні та гібридні сонячні інвертори. Автономні та гібридні сонячні інвертори в своїй конструкції мають контролери заряджання АБ, що дозволяє їм працювати в час відсутності чи зниження освітленості сонячних панелей. Сучасні автономні та гібридні сонячні інвертори можуть налаштовуватися на роботу з різними типами АБ.

Автономні сонячні інвертори застосовують в місцях відсутності централізованої електромережі, або як резервні. Автономний сонячний інвертор може заряджати АБ тільки від сонячних панелей (рис. 1.6).

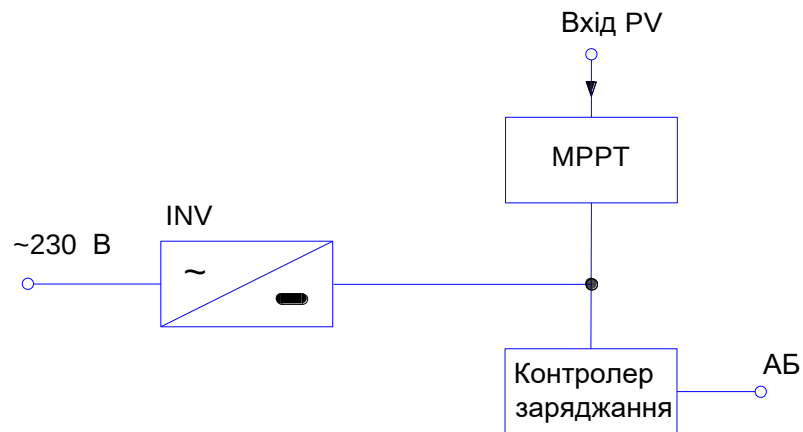


Рисунок 1.6 – Блок-схема автономного сонячного інвертора

В періоди слабкої освітленості, ефективність, з точки зору підвищення надійності електропостачання, СЕС заснованих на автономних сонячних інверторах знижується. В противагу, гібридний сонячний інвертор може працювати із мережею. Гібридний сонячний інвертор має всі властивості автономного та додатково він підключається до централізованої мережі. Зарезервована мережа може бути заживлена через гібридний інвертор від сонячних панелей, АБ або від централізованої електромережі.

Сучасні гібридні сонячні інвертори мають процесорне управління і дозволяють вибрати пріоритети джерел по живленню зарезервованої мережі домогосподарства. Заряджання АБ в гібридних інверторах може здійснюватися як від сонячних панелей так і від централізованої мережі, що значно підвищує надійність електропостачання. Гібридні інвертори «нового типу» мають властивості по «підмішуванню» електроенергії з централізованої мережі до електроенергії від сонячних панелей при недостатній продуктивності останніх, та експорту електроенергії у зовнішню мережу при надлишку енергії від сонячних батарей [18]. При відсутності договору на постачання електроенергії до централізованої мережі, гібридні інвертори можуть бути налаштовані на «нульовий експорт», що дозволяє використовувати надлишок сонячної електроенергії у власній незарезервованій мережі не постачаючи електроенергії до енергопостачальної

компанії. Контролер гібридного інвертора моніторить за допомогою трансформатора струму, встановленому на вводі після лічильника, напрямок струму не допускаючи, шляхом регулювання напруги експортованого струму, його витік за межі домогосподарства.

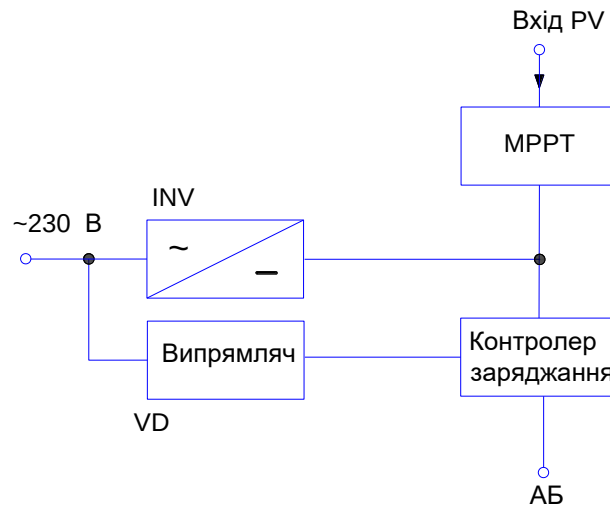


Рисунок 1.7 – Блок-схема гібридного сонячного інвертора

Гібридні інвертори за напругою АБ поділяються на низьковольтні та високовольтні. Високовольтні інвертори (напруга АБ більше 90 В) більше підходить до бізнесового використання. Для гібридних інверторів побутового рівня доцільно задіювати низьковольтні моделі. Широкого розповсюдження набули гібридні інвертори, в залежності від потужності, на напругу 12, 24 та 48 В.

Схема підключення сонячних інверторів до мережі містить захист від перенапруг зі сторони сонячних панелей та передбачає можливість переключення зарезервованої мережі до централізованого електропостачання з відключенням окремих елементів резервної системи електропостачання.

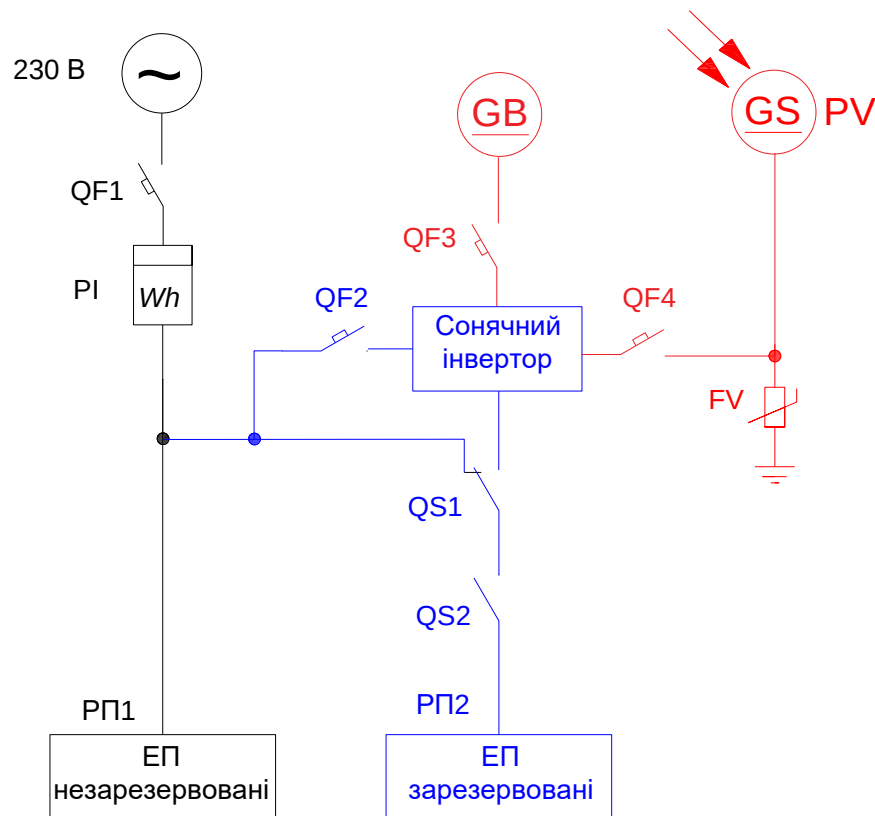


Рисунок 1.8 – Схема резервування на основі гібридного сонячного інвертора:

- чорний колір – незарезервована частина мережі; - синій колір – зарезервована частина мережі; - червоний колір – постійний струм;

QF1 – ввідний автоматичний вимикач мережі домогосподарства;

QF2 – вимикач інвертора від мережі;

QF3 – автоматичний вимикач захисту АБ; QF4 – автоматичний вимикач масиву сонячних панелей; FV – обмежувач перенапруг;

QS1 – перемикач «ручного режиму мережа – інвертор»; QS2 – вимикач навантаження зарезервованої мережі; PI – лічильник електричної енергії енергопостачальника; GB – акумуляторна батарея;

РП1 – розподільний пункт незарезервованої частини мережі;

РП2 – розподільний пункт зарезервованої частини мережі.

Гібридні сонячні інвертори мають широке застосування в сфері резервного живлення. Промисловість пропонує удосконалені гібридні сонячні інвертори, які мають окремий вхід для генератора. В налаштуваннях

гібридного сонячного інвертора можна вказати максимальну потужність генератора, яка не буде перевищена на генераторному вході.

Однотипні гібридні сонячні інвертори, запропоновані на ринку, можуть підключатися для паралельної роботи від 3 до 10 одиниць та більше, що створює перспективи подальшого розширення зарезервованої мережі. При цьому, між ними налагоджується зв'язок по каналах передачі даних, а налаштування здійснюють лише на головному інвертору.

1.5 Висновки

Найпростішими системами є використання генератора з двигуном внутрішнього згоряння або акумуляторного накопичувача електроенергії. Значною перевагою генератора є можливість його ввімкнення за будь-яких умов, забезпечивши паливом та підтримуючи його справний стан. Побутові генератори, як правило мають ручне керування пуском, тому в моменти відсутності людей в домогосподарстві їх ввімкнення є неможливим. Іншим недоліком генераторних систем резервування є потреба у регулярному заправленні паливом.

Повноцінна система резервування електропостачання має автоматично забезпечувати живленням життєво важливі пристрої домогосподарства. Використання ДБЖ дозволяє забезпечити безперебійність живлення основних пристроїв домогосподарства і заряджати власний акумулятор без участі людини у керуванні. ДБЖ збільшує витрачання електроенергії домогосподарством на розмір потужності споживання холостого ходу, втрат в інверторі та випрямлячі, втрат перетворення електроенергії в АБ. При тривалому знеструмленні та малому часу подачі електроенергії, АБ ДБЖ можуть не встигати заряджатися. Застосування сонячних панелей в системі резервного живлення підвищує автономність системи – резервна мережа та заряджання АБ здійснюється без наявності напруги в централізованій мережі. Для забезпечення високого рівня надійності електропостачання в осінньо-

зимовий період при малій сонячній генерації та у випадку значних за тривалістю відключеннях доцільно в резервну систему електропостачання включити генератор з двигуном внутрішнього згоряння. В такій комбінації електрообладнання, для домогосподарства підходить бензиновий генератор – він легко запускається в холодну пору, та потребує значно менших початкових вкладень, ніж дизельний. При цьому, для виключення перевантаження генератора його необхідно підключати до сонячного інвертора окремим «генераторним» входом.

Для повноцінної резервної системи електропостачання, яка зможе працювати при будь-якій тривалості відключення, має включати в себе гібридний сонячний інвертор, одне чи декілька полів сонячних панелей, акумуляторні системи накопичення на 8 – 10 годин автономної роботи та генератор з двигуном внутрішнього згоряння. Комбінування генератора з двигуном внутрішнього згоряння, сонячних панелей та АБ з додатковою можливістю заряджання від централізованої мережі забезпечить високий рівень надійності електропостачання зарезервованої мережі домогосподарства.

2 МЕТОДИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Визначення необхідної потужності зарезервованої мережі.

Потужність системи резервного електропостачання домогосподарства, порівняно з централізованим електропостачанням, є обмеженою і може не забезпечувати живленням всі електроприлади домогосподарства. Для вирішення цього протиріччя, електроприймачі домогосподарства необхідно поділити на дві групи важливості – зарезервовані та другорядні [А4]. До зарезервованих електроприймачів однозначно необхідно віднести життєво необхідні електроприлади – опалювальні котли з електронним управлінням, насоси індивідуальних станцій водопостачання, холодильники та морозильні камери, електрообладнання пожежної та охоронної сигналізації, аварійне освітлення, система відеоспостереження, яка за собою тягне і необхідність живлення комутаційних приладів інтернет зв'язку. До цієї групи можна, за потреби та можливостей бюджету системи резервування, додати прилади, які підвищують рівень комфорту. Це основне освітлення, що при використанні світлодіодних джерел освітлення є малоенергоємним, і загальна потужність його легко регулюється вмиканням тільки в необхідних просторах проживання. Також сюди можна включити частину кухонних пристроїв. Додавання мікрохвильової печі, яка має потужність біля 1200 Вт, але нетривалий час використання, до зарезервованої групи дозволяє значно підвищити сприйняття рівня добробуту. Також сюди можна додати, за наявності, електричну шафу – вона має досить значну потужність (2 – 3 кВт) та використовується тривалий час (до 1,5 – 2 год.). Але при її використанні небажані перерви електропостачання, що можуть призвести до втрати продукту, що готується в ній. Так як електрошафа використовується порівняно не часто, то її потужність може бути резервною для використання таких електроприладів, як фен, праска чи пилосос. При наявності в

приміщеннях кондиціонерів, їх при можливості бюджету, теж можна включити до зарезервованої мережі.

До другорядних електроприладів можна віднести пральну машину, додаткові опалювальні прилади – вони мають досить велику потужність споживання. Також сюди можна віднести господарські електроприлади, що обладнані потужними електродвигунами чи мають високі споживання потужності.

При автономному режимі електрозабезпечення має бути дотриманим баланс потужності джерела та споживання а також, при використанні накопичувачів електроенергії – достатній запас для необхідного часу роботи. Максимальна потужність резервного джерела, повинна бути достатньою для живлення зарезервованих електроприймачів:

$$P_{max \text{ ДЖ}} \geq \sum_{i=1}^n P_i, \text{ Вт} \quad (2.1)$$

де P_i – потужність i -го електроприймача зарезервованої мережі, Вт;

n – кількість електроприймачів зарезервованої мережі.

При застосуванні кількох гібридних інверторів в системі електропостачання, максимальна потужність кожного інвертора визначаємо з врахуванням їхньої кількості в системі за виразом:

$$P_{nom \text{ INV}} \geq \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{N_{INV}}, \text{ Вт} \quad (2.2)$$

де N_{INV} – кількість задіяних гібридних сонячних інверторів.

Для надійної роботи інверторів коефіцієнт завантаження має становити менше одиниці по активній, повній та пусковій потужностях:

$$k_{\text{зав.}} < 1. \quad (2.3)$$

Коефіцієнт завантаження по активній потужності визначаємо за виразом:

$$k_{\text{зав.акт.}} = \frac{N_{INV} \cdot P_{\text{ном } INV}}{\sum_{i=1}^n P_i}. \quad (2.4)$$

Коефіцієнт завантаження по повній потужності визначаємо за виразом:

$$k_{\text{зав.повн.}} = \frac{N_{INV} \cdot S_{\text{max } INV}}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\cos \varphi_i}}, \quad (2.5)$$

де $S_{\text{max } INV}$ – повна потужність інвертора, ВА;

$\cos \varphi_i$ – коефіцієнт потужності i -го електроприймача.

Коефіцієнт завантаження по пусковій потужності визначаємо за виразом:

$$k_{\text{зав.пуск.}} = \frac{N_{INV} \cdot P_{\text{ном } INV} \cdot k_{\text{пус,INV}}}{\sum_{i=1}^n P_i \cdot k_{\text{пус}_i}}, \quad (2.6)$$

де $k_{\text{пус } INV}$ – коефіцієнт пускового перевантаження інвертора;

$k_{\text{пус}_i}$ – коефіцієнт пускового струму i -го електроприймача.

2.2 Методика визначення мінімальної потужності генератора.

Потужність генераторної установки визначаємо в залежності від типу включення в систему резервного електропостачання. Для схеми на рис.1.1, потужність генератора визначаємо за формулою (2.1). При вмиканні генератора до спеціального генераторного входу інвертора, та при наявності АБ, що підключені до інвертора, потужність генератора може бути значно меншою – інвертор з АБ буде виконувати роль буферного накопичувача. Максимальна потужність резервного джерела в такому варіанті буде обмежуватися потужністю інвертора. Сам генератор повинен забезпечувати домогосподарство електроенергією під час повного відключення, умовно необмеженого в часі. Тривалість роботи генератора з ручним управлінням в домогосподарстві є обмеженою – на час присутності особи, яка контролює його роботу в активну пору доби.

Потужність генератора в такому варіанті має забезпечувати середню потужність споживання домогосподарства та компенсувати втрати енергії в інверторі та АБ. Для ефективної та довговічної роботи генераторів їх завантаженість має становити 70 – 80 % від номінальної потужності [15]. При зниженні коефіцієнта завантаження зростає питома витрата пального, а збільшення завантаження окрім росту рівня витрат пального, зменшує моторесурс електрогенератора.

За даними річного споживання електроенергії домогосподарством визначаємо максимальне середньодобове споживання. Потужність генератора розраховуємо за виразом:

$$P_{\text{ном.ген}} \geq \frac{k_{\text{зап}}}{k_{\text{зав}}} \cdot \frac{W_{\text{сер.доб.}}}{T_{\text{роб.ген}}}, \text{ кВт} \quad (2.7)$$

де $k_{\text{зап}}$ – коефіцієнт запасу потужності на втрати інверторі та АБ;

$k_{зав}$ – коефіцієнт завантаження генератора, для побутових генераторів 60 – 80 %;

$W_{сер.доб.}$ – середньодобове споживання електроенергії домогосподарством для місяця з максимальним споживанням, кВт·год.;

$T_{роб.ген.}$ – тривалість роботи генератора на добу, год.

2.3 Методика визначення параметрів акумуляторних батарей

АБ для резервної системи вибираємо за номінальною напругою, максимальним струмом розрядження та ємністю.

Напруга АБ має відповідати напрузі виходу інвертора на АБ. Максимальний струм, що споживається з акумуляторного накопичувача визначається за виразом:

$$I_{max\Sigma AB} = \frac{N_{INV} \cdot P_{max.INV}}{k_{ef.INV} \cdot U_{ном.АБ}}, \text{ А} \quad (2.8)$$

де $P_{max.INV}$ – максимальна вихідна потужність інвертора по змінному струму, Вт;

$k_{ef.INV}$ – коефіцієнт ефективності інвертора перетворення постійного струму в змінний;

$U_{ном.АБ}$ – номінальна напруга АБ, В.

Паспортне значення розрядного струму АБ має бути достатнім для роботи інверторів при максимальній потужності. Кількість АБ в накопичувачі визначаємо, виходячи з паспортного максимального розрядного струму АБ :

$$N_{AB} \geq \frac{I_{max\Sigma AB}}{I_{роз.АБ}} \quad (2.9)$$

де $I_{роз.АБ}$ – паспортне значення максимального розрядного струму АБ.

Отримане за виразом (2.9) значення округлюємо до більшого цілого.

Енергоємність АБ розраховуємо виходячи з обсягу електричної енергії необхідного для живлення зарезервованої мережі протягом заданого часу з врахуванням втрат в інверторі. При розрахунку споживання електроенергії враховуємо за трьома групами:

- постійно ввімкнені електроприлади в активну пору доби;
- електроприлади одноразового ввімкнення під час знеструмлення мережі – для необхідності закінчення робочого циклу;
- постійно ввімкнені електроприлади в нічну пору доби.

Споживання електроенергії електроприладами зарезервованої мережі від АБ при знеструмленні розраховуємо за виразом:

$$W_{\text{зарез}} = \frac{P_{\text{день}} \cdot t_{\text{день}} + P_{\text{ніч}} \cdot t_{\text{ніч}} + W_{\text{раз}}}{k_{\text{еф.INV}}}, \text{ Вт} \cdot \text{год.} \quad (2.10)$$

де $P_{\text{день}}$ – середня активна потужність споживачів зарезервованої мережі в активну пору доби, Вт;

$P_{\text{ніч}}$ – середня активна потужність споживачів зарезервованої мережі в нічну пору доби, Вт;

$W_{\text{раз}}$ – споживання електроенергії на одне відключення, пов'язане з необхідністю закінчення робочого циклу, Вт·год.;

$k_{\text{еф.INV}}$ – коефіцієнт ефективності інвертора;

$t_{\text{день}}$ – заданий час роботи від акумулятора в денну пору доби, год.;

$t_{\text{ніч}}$ – заданий час роботи від акумулятора в нічну пору доби, год.

Розрахункова енергоємність АБ розраховуємо за виразом:

$$W_{\text{розр.АБ}} = \frac{W_{\text{зарез}} + P_{\text{вл. INV}} \cdot (t_{\text{день}} + t_{\text{ніч}})}{k_{\text{DOD}}}, \text{ Вт} \cdot \text{год.} \quad (2.11)$$

де k_{DOD} – коефіцієнт рекомендованої глибини розряду АБ;

$P_{\text{вл. INV}}$ – потужність власного споживання інвертора, Вт.

Вибрана до встановлення АБ з енергоємністю $W_{\text{АБ}}$ має відповідати наступній умові:

$$W_{\text{АБ}} \geq W_{\text{розр. АБ}}. \quad (2.12)$$

Для забезпечення виконання умови виразу (2.12) протягом всього терміну використання АБ її ємність визначаємо з врахуванням деградації на кінець експлуатації:

$$W_{\text{АБ}} = k_{\text{EOL}} \cdot W_{\text{ном АБ}}, \text{ Вт} \cdot \text{год}. \quad (2.13)$$

де k_{EOL} – коефіцієнт залишкової ємності АБ на кінець терміну експлуатації;

$W_{\text{ном АБ}}$ – номінальна енергоємність АБ, Вт·год.

2.4 Методика розрахунку фотовольтаїки

Параметри масиву сонячних панелей має відповідати фотовольтаїчному входу інвертора за максимальною напругою, та за максимальним струмом. Рекомендована оптимальна напруга сонячного поля має бути близькою до номінальної напруги МРРТ інвертора. При наявності в інверторі кількох МРР трекерів, розрахунки здійснюємо для незалежних сонячних масивів. При технічних можливостях підключення кількох стрінгів до одного МРРТ, вони мають бути однаковими.

Підбір сонячних панелей розпочинаємо за максимальним струмом. При одному стрінгові на МРР трекер, струм трекара рівний струму однієї панелі, при підключенні до МРР трекара кількох стрінгів їхні струми додаються. Паспортний вхідний струм МРР трекара має бути більшим за суму струмів

підключених до нього стрінгів:

$$I_{DC\ MPPT} \geq n_{\text{стрінг}} \cdot I_{MP} \quad (2.14)$$

де $I_{DC\ MPPT}$ – максимальний вхідний струм МРР трекера інвертора, В;

$n_{\text{стрінг}}$ – кількість стрінгів, підключених до МРР трекера;

I_{MP} – струм максимальної потужності сонячної панелі, А.

Кількість сонячних панелей одного стрінга для максимальної потужності сонячних панелей визначаємо за виразом:

$$n_{\text{пан}MP} = \frac{U_{nom\ DC}}{U_{MP}}, \quad (2.15)$$

де $U_{nom\ DC}$ – номінальна напруга МРРТ, В;

U_{MP} – напруга сонячної панелі, що відповідає максимальній потужності, В.

Отримане значення округляємо до найближчого цілого та отримуємо фактичну кількість сонячних панелей у стрінгу – $n_{\text{пан}}$.

Сонячні панелі мають зворотній температурний зв'язок з напругою, тому розраховуємо напругу стрінга для мінімально можливої температури в регіоні за виразом:

$$U_{\text{max.стрінга}} = n_{\text{пан}} \cdot U_{xx} \cdot \left(1 + (T_{\min} - T_0) \cdot \frac{k_{tU}}{100} \right), \text{ В} \quad (2.16)$$

де U_{xx} – напруга холостого ходу сонячних панелей за умовами STC, В;

$T_{\min}$ – мінімальна температура в регіоні, °С;

T_0 – номінальна температура сонячної панелі, для умов STC дорівнює 25°С;

k_{tU} – температурний коефіцієнт напруги сонячної панелі (паспортне значення).

Максимальна можлива напруга не має перевищувати максимальної напруги входу МРРТ інвертора:

$$U_{maxDC} \geq U_{max.стрінга}, В. \quad (2.17)$$

При невиконанні умови виразу (1.10) кількість панелей в стрінгові зменшуємо на одну і повторюємо розрахунки з виразу (1.9) доки почне виконуватися умова виразу (1.10).

Номінальну напругу отриманого стрінга обчислюємо за виразом:

$$U_{nom \text{ стрінга}} = n_{пан} \cdot U_{MP}, В. \quad (2.18)$$

Вхідна напруга МРР трекера рівна номінальній напрузі стрінга:

$$U_{Вх. МРРТ} = U_{nom \text{ стрінга}}. \quad (2.19)$$

Максимальну підключену потужність масиву сонячних панелей до МРРТ обчислюємо за виразом:

$$P_{МРРТ} = U_{Вх. МРРТ} \cdot n_{стрінг} \cdot I_{MP}, Вт. \quad (2.20)$$

До кожного МРР трекера можуть бути підключений масиви з різними наборами сонячних панелей. Тому розрахунки повторюємо для кожного МРРТ від виразу (2.14) до виразу (2.20) .

Максимальну підключену потужність масиву сонячних панелей для всіх MPPT обчислюємо за виразом:

$$P_{maxPV} = \sum_{i=1}^n P_{MPPT_i}, \text{ Вт} \quad (2.21)$$

де n – кількість MPPT трекерів в системі з підключеними сонячними панелями до них.

Розраховану за виразом (2.20) потужність масив сонячних панелей може розвивати лише при освітленості та температурі, що відповідають умовам STC. Умови встановлення сонячних панелей в реальності не відповідають оптимальним. Масиви сонячних панелей можуть мати різні кути нахилу та орієнтування по азимуту. На генерацію електроенергії сонячними панелями впливає їх температура. Умови освітленості сонячних панелей динамічно змінюються:

- протягом дня – обертання землі змінює кут падіння сонячних променів;
- протягом року змінюється кут падіння сонячних променів за рахунок зміни нахилу планети.

Для визначення потужності CEC застосуємо он-лайн калькулятор PVWatts [9]. Визначаємо помісячну генерацію електроенергії окремо для кожного MPPT трекера. За допомогою калькулятора PVWatts отримуємо доступ до даних про погоду з Національної бази даних сонячного випромінювання NLR (NSRDB) для елемента сітки, що відповідає розміщенню CEC.

Калькулятор PVWatts дозволяє враховувати втрати в інверторі, що дає можливість отримати результати не тільки по виробництву електроенергії постійного струму, але і енергії змінного струму. Для знаходження обсягів генерованої електроенергії необхідно внести інформацію про систему:

- потужність масиву сонячних панелей MPP трекера розраховану за виразом (2.13) для умов випробування STC;
- тип панелей, що визначає їхню ефективність;
- тип кріплення панелей – фіксовано чи поворотні;
- втрати системи на забруднення, затінення та деградацію панелей, втрати в проводці і з'єднаннях.
- нахил сонячних панелей в градусах;
- орієнтування сонячних панелей по азимуту в градусах;

В розширених параметрах вводимо коефіцієнт співвідношення постійного струму для умов STC та змінного струму, паспортне значення ефективності інвертора, кількість робочих сторін панелей – двостороння чи одностороння. Для нерухомо закріплених панелей на дахах будівель, незалежно від характеристики панелі по кількості робочих сторін, значення параметра має відповідати односторонній панелі.

Коефіцієнт співвідношення постійного струму для умов STC та змінного струму визначаємо за виразом:

$$k_{dc/ac} = \frac{P_{maxPV}}{P_{nom INV}}. \quad (2.22)$$

Виробництво електроенергії власною сонячною електростанцією за період розраховуємо як суму по всіх MPP трекерах:

$$W_{сес} = \sum_{i=1}^n W_{MPPT i}, \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (2.23)$$

де $W_{MPPT i}$ – генерація електроенергії i -го MPP трекера за період, кВт·год.

2.5 Методика розрахунків економічних показників експлуатації комбінованої системи електропостачання

Вибір обладнання за потужністю та якісними характеристиками обмежується бюджетом проекту. Економічні чинники, на рівні з електротехнічними, мають вагомий вплив на рішення по виборі обладнання енергосистеми, в основній мірі по співвідношенню вартості та споживчо-якісних показників.

В основі побудови обраної комбінованої системи електропостачання знаходиться гібридний інвертор. При виборі цінового діапазону необхідно врахувати якісний рівень інвертора – виробник має бути перевірений з доброю репутацією, з гарантійними термінами на обладнання 5 – 10 років, з можливістю післягарантійного обслуговування, що забезпечує очікуваний термін використання не менше 10 років.

Вибір АБ для резервної системи аналогічний до інвертора – це має бути перевірений виробник, з надійною гарантією та тривалим строком служби.

При визначенні вибору оптимальної потужності інвертора можна скористатися питомою ціною потужності інвертора, що визначається серед альтернативних варіантів за виразом:

$$C_{\text{кВт}} = \frac{C}{P_{\text{ном}}}, \text{Грн./кВт} \quad (2.24)$$

де C_{INV} – ціна інвертора, Грн.;

$P_{\text{ном INV}}$ – номінальна потужність інвертора, кВт.

Економічний інтерес підвищувати бюджет проекту стимулює зниження питомої ціни. Критерієм оптимальної потужності інвертора є наближення питомої ціни до мінімальної:

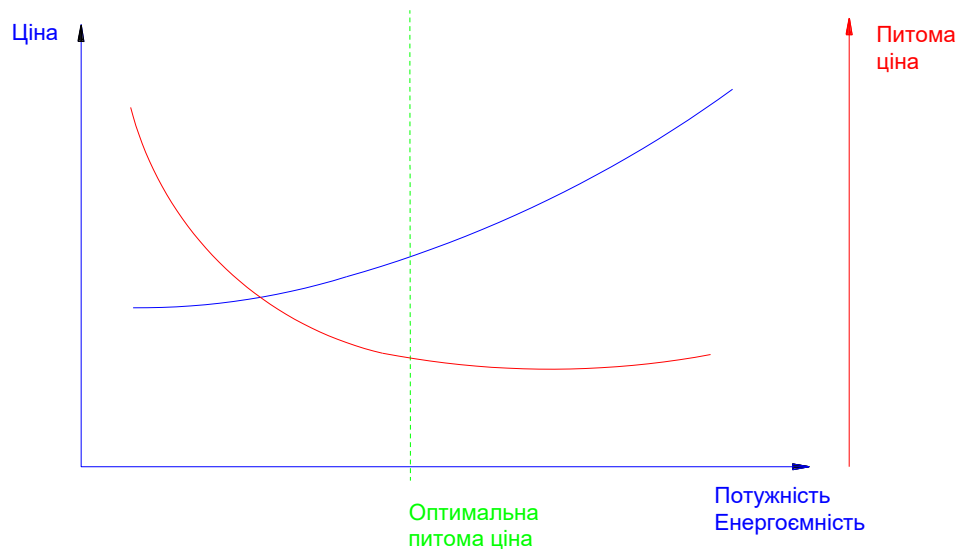


Рисунок 2.1 – Визначення оптимального співвідношення ціна-потужність

Ціна електроенергії є найважливішим параметром для вибору джерела електропостачання. Основними складовими маржинальної ціни електроенергії, отриманої від генератора є паливно-мастильні матеріали.

Вартість пального на виробництво 1 кВт·год. електроенергії генератором визначаємо за виразом:

$$B_{\text{пальн}} = g_{\text{пальн}} \cdot C_{\text{пальн}}, \text{ Грн/кВт} \cdot \text{год.} \quad (2.25)$$

де $g_{\text{пальн}}$ – питома витрати пального, л/кВт·год. (табл. 1.1);

$C_{\text{пальн}}$ – ціна пального, грн./л.

Вартість моторного мастила для генератора на виробництво 1 кВт·год. електроенергії:

$$B_{\text{мас}} = \frac{V_{\text{мас}} \cdot C_{\text{мас}}}{t_{\text{обсл}} \cdot P_{\text{ном.ген}} \cdot k_{\text{зав}}}, \text{ Грн/кВт} \cdot \text{год.} \quad (2.26)$$

де $V_{\text{мас}}$ – об'єм масла в двигуні генератора;

$t_{\text{обсл}}$ – періодичність заміни моторного масла, год;

$\Pi_{\text{мас}}$ – ціна моторного масла, грн./л.

Змінні витрати на виробництво електроенергії генератором:

$$V_{\text{зм.ген}} = V_{\text{пальн}} + V_{\text{мас}}, \text{Грн/кВт} \cdot \text{год.} \quad (2.27)$$

Питому амортизацію генератора розраховуємо за виразом:

$$A_{\text{ген}} = \frac{\Pi_{\text{ген}}}{t_{\text{кор}} \cdot P_{\text{ном.ген}} \cdot k_{\text{зав}}}, \text{Грн/кВт} \cdot \text{год.} \quad (2.28)$$

де $t_{\text{кор}}$ – очікуваний моторесурс генератора, год.

Повна вартість електроенергії отриманої від генератора визначаємо за виразом:

$$V_{\text{ЕЕ ген}} = V_{\text{зм.ген}} + A_{\text{ген}}, \text{Грн/кВт} \cdot \text{год.} \quad (2.29)$$

При використанні накопиченої електроенергії отриманої з централізованої мережі, змінні витрати залежать від ціни закупки електроенергії з урахуванням ефективності інвертора і АБ:

$$V_{\text{зм.дбж}} = \frac{\Pi_{\text{зак ЕЕ}}}{k_{\text{еф.INV}} \cdot k_{\text{еф.АБ}}}, \text{Грн/кВт} \cdot \text{год.} \quad (2.30)$$

де $\Pi_{\text{зак ЕЕ}}$ – ціна купівлі електроенергії, Грн./кВт·год.;

$k_{\text{еф.АБ}}$ – коефіцієнт ефективності АБ.

Питому амортизацію накопичувача електроенергії розраховуємо за

виразом:

$$A_{\text{дбж}} = \frac{C_{\text{INV}}}{t_{\text{корINV}} \cdot W_{\text{річн.}}} + \frac{C_{\text{АБ}}}{W_{\text{ресАБ}}}, \text{ Грн/кВт} \cdot \text{год.} \quad (2.31)$$

де C_{INV} – ціна інвертора, грн.;

$C_{\text{АБ}}$ – ціна АБ, грн.;

$t_{\text{корINV}}$ – очікуваний корисний термін використання інвертора, років;

$W_{\text{ресАБ}}$ – енергопропускна здатність АБ, кВт·год.;

$W_{\text{річн.}}$ – обсяги споживання електроенергії домогосподарством за рік, кВт·год.

Повна вартість електроенергії при застосуванні накопичувача:

$$B_{\text{ЕЕ дбж}} = B_{\text{зм.дбж}} + A_{\text{дбж}}, \text{ Грн/кВт} \cdot \text{год.} \quad (2.32)$$

При генерації електроенергії СЕС змінні витрати практично відсутні. При наявності інвертора з АБ, маржинальні витрати СЕС, включають в себе витрати на улаштування масиву сонячних панелей. Маржинальні витрати на СЕС домогосподарства в даному випадку будуть рівними сумі амортизаційних витрат масиву сонячних панелей:

$$B_{\text{марж.сес}} = A_{\text{PV}} = \frac{C_{\text{PV}}}{t_{\text{корPV}} \cdot W_{\text{сес}}}, \text{ Грн/кВт} \cdot \text{год.}, \quad (2.33)$$

де A_{PV} – амортизація масиву сонячних панелей, грн.;

C_{PV} – ціна масиву сонячних панелей, грн.;

$t_{\text{корPV}}$ – очікуваний корисний термін використання масиву сонячних панелей, років;

$W_{\text{сес}}$ – обсяги генерації електроенергії СЕС за рік. У випадку перевищення генерації СЕС над річним споживанням домогосподарства прийняти, що $W_{\text{сес}} = W_{\text{річн.}}$, кВт·год.

Повна вартість електроенергії згенерованої СЕС:

$$B_{\text{ЕЕ сес}} = A_{\text{дбж}} + \frac{C_{PV}}{t_{\text{корPV}} \cdot W_{\text{сес}}}, \text{ Грн/кВт} \cdot \text{год.} \quad (2.34)$$

2.5 Висновки

Методика розрахунків комбінованої системи електропостачання базується на загальнонаукових методах аналізу та синтезу. Описано порядок поділу домашньої мережі на дві частини – життєво важливу та другорядну. Формалізовано правила визначення параметрів окремих складових комбінованої системи електропостачання – генераторної установки з ДВС, гібридного інвертора, АБ та масивів сонячних панелей. Усі складові комбінованої системи електропостачання за розрахунками методики мають узгоджені параметри.

В методиці та формалізовано визначення економічних показників експлуатації комбінованої системи електропостачання.

3 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

3.1 Розподіл мережі домогосподарства

Для домогосподарства складаємо відомість електричних приладів з визначенням їхньої важливості.

Таблиця 3.1 – Відомість навантаження домогосподарства

№ пп	Найменування приладу	Встановлена потужність, Вт	Категорія важливості
1	Газовий котел	120	Важливий
2	Холодильник	300	Важливий
3	Холодильник інверторний	160	Важливий
4	Морозильна камера	150	Важливий
5	Мікрохвильова піч	1 200	Важливий
6	Електродуховка	2 000	Важливий
7	Витяжка кухонна	120	Важливий
8	Автоматична пральна машина	2 100	Другорядний
9	Електронагрівач	2 000	Другорядний
10	Пилосос	1 800	Другорядний
11	Фен	2 100	Другорядний
12	Праска	2 200	Другорядний
13	Кухонний комбайн	1 000	Другорядний
14	Ноутбук	65	Важливий
15	Ноутбук	45	Важливий
16	Комутаційне обладнання (модем і роутер)	30	Важливий
17	Телевізор	80	Другорядний
18	Телевізор	115	Важливий
19	Навантаження господарської будівлі	3 500	Другорядний
20	Освітлення	400	Важливий
21	Зарядні пристрої	196	Важливий
22	По домогосподарству	19 681	

Складаємо відомість життєво важливого електрообладнання та визначаємо максимальну потужність зарезервованої мережі для домогосподарства.

Таблиця 3.2 – Потужність електроприймачів зарезервованої мережі

№ пп	Найменування приладу	Розрахункова активна потужність, Вт	Розрахункова повна потужність, ВА	Пускова потужність ВА
1	Газовий котел	120	171	514
2	Холодильник	300	429	1500
3	Холодильник інверторний	160	200	300
4	Морозильна камера	150	214	750
5	Мікрохвильова піч	1200	1263	2526
6	Електродуховка	2000	2000	2000
7	Витяжка кухонна	120	171	514
8	Ноутбук	65	68	68
9	Ноутбук	45	47	47
10	Комутаційне обладнання (модем і роутер)	30	32	32
11	Телевізор	115	121	121
12	Освітлення	100	105	105
13	Зарядні пристрої	98	103	103
14	По домогосподарству	4 503	4 926	8 582

3.2 Вибір гібридного інвертора

Для потужності зарезервованої мережі 4503 Вт по табл. 1.2 визначаємо оптимальну напругу АБ для гібридного інвертора – 48 В.

Комбіновану систему електропостачання обладнуємо перевіреними за надійністю гібридними інверторами. На українському ринку представлено інвертори таких марок – DEYE, Solis, Growatt, Victron Energy та інших. Для досліджуваної комбінованої системи електропостачання розглянемо

модельний ряд однофазних гібридних інверторів SUN-(3.6-10)K-SG05LP1-EU-AM2-P торгової марки DEYE, потужністю від 3,6 кВт до 10 кВт [7,18]. Інвертори забезпечуються гарантією від виробника 5 або 10 років, в залежності від умов встановлення.

Таблиця 3.3 – Модельний ряд гібридних інверторів SUN-(3.6-10)K-SG05LP1

Параметри	Модельний ряд гібридних інверторів						
	SUN-3.6K-SG05LP1	SUN-5K-SG05LP2	SUN-6K-SG05LP3	SUN-7K-SG05LP4	SUN-7,6K-SG05LP5	SUN-8K-SG05LP6	SUN-10K-SG05LP7
Вихідна активна потужність, Вт	3 600	5 000	6 000	7 000	7 600	8 000	10 000
Вихідна повна потужність, ВА	3 960	5 500	6 600	7 700	8 360	8 800	11 000
Пускова потужність, Вт	7 200	10 000	12 000	14 000	15 200	16 000	20 000

За табл. 3.3 вибираємо дві найближчі за потужністю моделі гібридних інверторів, що задовольняють виконанню умови виразу (2.2):

- SUN-5K-SG05LP1-EU-AM2-P;
- SUN-6K-SG05LP1-EU-AM2-P.

Аналіз співвідношення ціни інвертора до потужності за виразом (2.20) ставить в лідери модель SUN-6K-SG05LP1-EU-AM2-P (Рис.3.1). Гібридний інвертор з номінальною потужністю 6 кВт має найменшу вартість 1 кВт потужності, при цьому його ціна незначно переважає ціну гібридного інвертора з меншими номінальними потужностями – 3,6 кВт та 5 кВт.

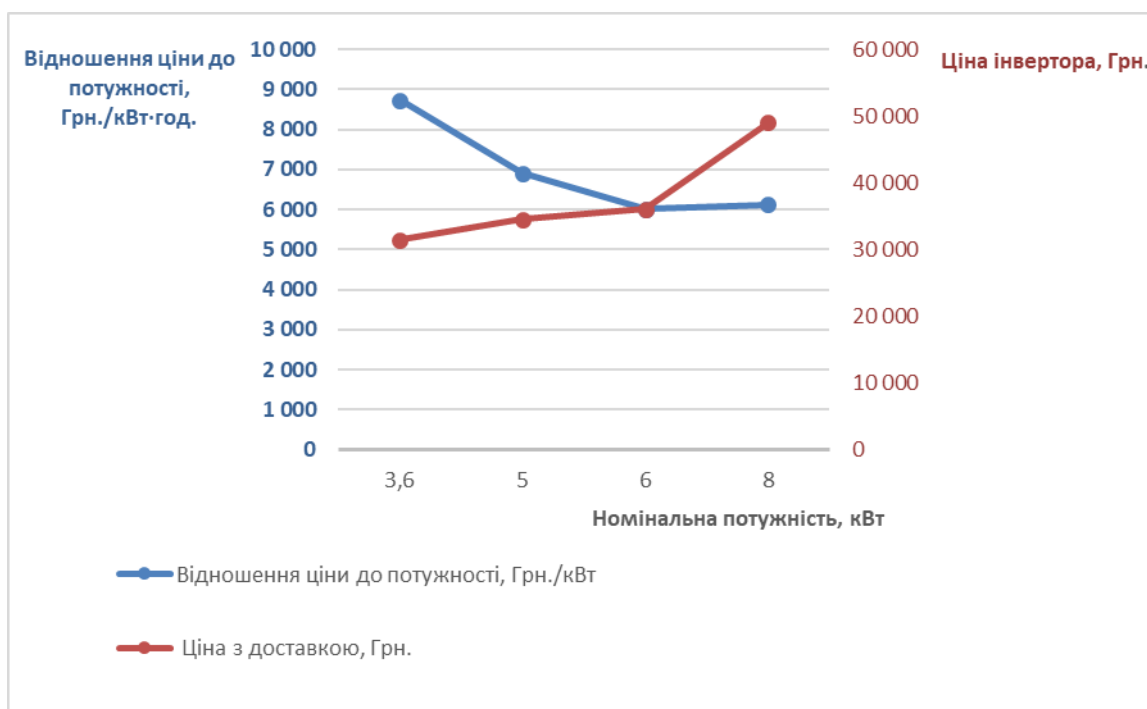


Рисунок 3.1 – Співвідношення ціна – потужність гібридних інверторів

Можливий варіант установки двох гібридних інверторів SUN-3,6K-SG05LP1. Так як ціна одного інвертора потужністю 3,6 кВт не значно відрізняються за ціною від обраних інверторів, тому такий варіант є недоцільним. За виразами (2.4), (2.5) та (2.5) розраховуємо коефіцієнти завантаження.

Таблиця 3.4 – Коефіцієнти завантаження гібридних інверторів

Параметри	SUN-5K-SG05LP1	SUN-6K-SG05LP1
Коефіцієнт завантаження по активній потужності	90,1%	75,1%
Коефіцієнт завантаження по повній потужності	89,6%	74,6%
Коефіцієнт завантаження по пусковій потужності	85,8%	71,5%

Обрані гібридні інвертори задовільняють умові (2.3) та мають запас потужності в усталеному режимі роботи мережі і в перехідних режимах пуску електроприладів.

Таблиця 3.5 – Характеристики обраних гібридних інверторів

Параметри	SUN-5K-SG05LP1-EU-AM2-P	SUN-6K-SG05LP1-EU-AM2-P
Вхід акумуляторної батареї		
Номінальна напруга АБ, В	40 - 60	40 - 60
Максимальний зарядний струм, А	120	135
Максимальний струм розряду, А	120	135
Вхід фотовольтаїки		
Максимальна підключена потужність, Вт	10 000	12 000
Максимальна вхідна потужність, Вт	8 000	9 600
Максимальна вхідна напруга, В	500	500
Номінальна вхідна напруга, В	370	370
Діапазон напруги МРРТ, В	150 - 425	150 - 425
Стартова напруга, В	125	125
Кількість МРРТ/кількість стрінгів	2/1+1	2/1+1
Максимальний вхідний робочий струм, А	18+18	18+18
Максимальний струм короткого замикання, А	27+27	27+27
Ефективність МРРТ, %	>99%	>99%
Змінний струм		
Номінальна потужність активна, Вт	5000	6000
Повна потужність, ВА	5500	6600
Максимальний вхідний струм, А	25	30
Максимальний вихідний струм, А	23,9	28,7
Коефіцієнт пускового перевантаження	2	2
Номінальна напруга, В	220/230 (-15%..+10%)	
Коефіцієнт потужності	-0,8..+0,8	
Ефективність інвертора, %	96,5	

Обидва гібридних інвертори надають можливість улаштування двох незалежних масивів сонячних панелей. З табл. 3.2 визначаємо коефіцієнт потужності зарезервованої мережі 0,91, що відповідає параметрам гібридного інвертора (табл.3.5).

3.3 Вибір акумуляторної батареї

На даному етапі розвитку акумуляторних батарей для комбінованої системи електропостачання оптимальним є використання літій-залізо-фосфатних АБ (табл. 1.3) [5, 12]. Відомі виробники літій-залізо-фосфатних АБ – Dyness, Deye, Growatt, NKON та інші – надають гарантію 5 – 10 років. Для дослідження приймаємо АБ марки Deye – використання обладнання одного виробника підвищує ймовірність сумісності при налагодженні зв'язку між ними по каналам передачі даних та при налаштуваннях. Акумуляторні батареї DEYE SE-F(5/12/16) оснащені комплексним захистом – в них вмонтовано удосконалений BMS та активний запобіжник. Їх застосування дає можливості по розширенню енергоємності шляхом додавання АБ до максимально можливої кількості 32 од. Монтаж АБ даної серії можливий підлоговий, настінний та в стійці. АБ даної лінійки автоматично підключаються до мережі та дозволяють моніторити їх стан та режими роботи [17].

За виразом (2.8) розраховуємо необхідний максимальний розрядний струм АБ для обраних інверторів:

- Для гібридного інвертора номінальною потужністю 5 кВт, АБ повинна бути здатною тривало видавати розрядний струм 110 А, короткочасно – 220 А;
- Для гібридного інвертора номінальною потужністю 6 кВт, АБ повинна бути здатною тривало видавати розрядний струм 130 А, короткочасно – 260 А.

Умові виразу (2.9), при одиночному встановленні відповідають АБ моделей SE-F12 та SE-F16 (табл. 3.6). Модель SE-F5 Pro потребує установки двох АБ.

Для розрахунків енергоємності АБ необхідно визначитися з тривалістю роботи зарезервованої мережі від АБ в денну пору доби та в нічну. В списку електроприладів підключених до зарезервованої мережі завершення робочого циклу при знеструмленні потребує електрошафа. Середню споживану потужність електроприладів беремо з їх характеристик.

Таблиця 3.6 – Середнє споживання електроенергії електроприладами зарезервованої мережі

Найменування приладу	Денна потужність споживання, $P_{\text{день}}$, Вт	Потужність споживання на одне відключення, $W_{\text{раз}}$, Вт·год.	Нічна потужність споживання, $P_{\text{ніч}}$, Вт
Газовий котел	120		120
Холодильник	56		56
Холодильник інверторний	42		42
Морозильна камера	22		22
Мікрохвильова піч	60		
Ноутбук	32		
Ноутбук	23		
Комутаційне обладнання (модем і роутер)	30		30
Телевізор	28		
Освітлення	50		
Зарядні пристрої	25		
Електродуховка		2250	
Витяжка кухонна		135	
По домогосподарству	488	2 385	270

Таблиця 3.7 – Основні характеристики акумуляторних батарей

Параметри	Модель АБ		
	SE-F5 Pro	SE-F12	SE-F16
Тип	LiFePO ₄	LiFePO ₄	LiFePO ₄
Ємність, А·год.	100	230	314
Масштабованість, шт.	32	32	32
Номінальна напруга, В	51,2	51,2	51,2
Номінальна енергія, кВт·год.	5,1	11,8	16
Номінальна енергія при досягненні EOL 70%, кВт·год.	3,57	8,26	11,2
Рекомендований струм заряду, А	50	115	157
Максимальний струм заряду, А	100	230	160
Рекомендований струм розряду, А	50	115	157
Тривалий максимальний струм розряду, А	100	230	230
Піковий розрядний струм (10с), А	150	280	280
Рекомендована глибина розряду, DOD	90%	90%	90%
Ступінь захисту, IP	21	21	21
Робоча температура, °C	0 - 55	0 - 55	0 - 55
Кількість циклів заряду/розряду, не менше	6000	6000	6000
при умовах експлуатації :			
- температура	25°C ±2°C	25°C ±2°C	25°C ±2°C
- EOL	70%	70%	70%
Енергопропускна здатність, МВт·год.	16	37	50

За даними таблиці 3.6 та використовуючи вираз (2.10) розраховуємо споживання зарезервованої мережі від АБ з врахуванням ефективності інвертора. Розрахункову енергоемність АБ визначаємо за виразом (2.11), який враховує власне споживання гібридним інвертором та рекомендований рівень розряджання АБ. Співставляючи розрахункову енергоемність АБ та фактичну енергоемність АБ при досягненні кінця експлуатації (EOL) приймаємо до

встановлення необхідну модель АБ в залежності від варіанту моделювання тривалості автономної роботи.

Таблиця 3.8 – Вибір акумуляторних батарей

Параметри	Варіанти за тривалістю автономної роботи		
	I	II	III
Тривалість автономної роботи від АБ, год.: денна пора доби, $t_{\text{день}}$ нічна пора доби, $t_{\text{ніч}}$	4 8	6 8	8 10
Споживання електроприладами, Вт·год.	6 733	7 744	9 315
Власне споживання інвертора, Вт·год.	600	700	900
Глибина розряду, DOD, %	90%	90%	90%
Розрахункова енергоємність АБ, Вт·год.	8 147	9 382	11 350
Прийнята до встановлення АБ	SE-F12	SE-F16	SE-F16

3.4 Розрахунок і моделювання роботи фотовольтаїки

Сонячні панелі в домогосподарстві вигідно розмістити на дахах будинка та господарських будівель, щоб сонячні панелі не забирали корисну площу, яка в домогосподарстві є обмеженою. Дах будівель домогосподарства має темний відтінок, тому приросту електрогенерації від використання двосторонніх модулів майже не буде – достатньо використати односторонні (монофаціальні) панелі. За результатами аналізу споживчих характеристик сонячних панелей, що представлені в Україні, перевагу слід надати монокристалічним панелям. Полікристалічні сонячні панелі при меншій відносній вартості мають значно вищу ефективність, більші строки гарантій та меншу деградацію при більшому строку експлуатації.

Таблиця 3.9 – Порівняння сонячних панелей різних типів

Параметр	Longi Yi-Mo x10 Explorer LR7-72HVN-650M	BlueSolar 330W-24V Poly Victron Energy
Тип панелі	Монокристалічна	Полікристалічна
Виробник	Longi Solar	Victron Energy
Ціна, грн.	5750	9040
Максимальна потужність $P_{\max}$, Вт	650	330
Ціна 1 Вт потужності панелі, грн.	8,85	27,39
Ефективність, %	24,1	16,6
Гарантія на матеріали, років	15	5
Гарантія електричної потужності, років	30	25
Збереження потужності, %	88,85	80
Розміри, мм	2382x1134x30	1980x1002x40
Вага, кг	28,5	23,0

Обрані гібридні інвертори SUN-5K-SG05LP1-EU-AM2-P та SUN-6K-SG05LP1-EU-AM2-P мають однакові входні параметри фотовольтаїки за струмом та напругою. Обидві моделі мають два MPP трекера, до кожного з яких можна під'єднати по одному стрінгу сонячних панелей. Розрахунки фотовольтаїки здійснюємо окремо для кожного MPP трекера. Сонячні панелі вибираємо за робочим струмом, дотримуючись виконання умови (2.14).

Для сонячного масиву, як варіант, застосуємо преміальні сонячні панелі Longi Yi-Mo x10 Explorer LR7-72HVN-650M [20], які характеризуються низьким рівнем деградації протягом терміну експлуатації (рис. 3.2). Товщина захисного скла панелі складає 3,2 мм. Панелі витримують значне вітрове та снігове навантаження з лицьової сторони – 5400 Па, та вітрове із тильної сторони – 2400 Па, стійкі до випробування градом діаметром до 25 мм з

швидкістю до 23 м/с. Розподільча коробка панелі має достатній клас захисту IP68.

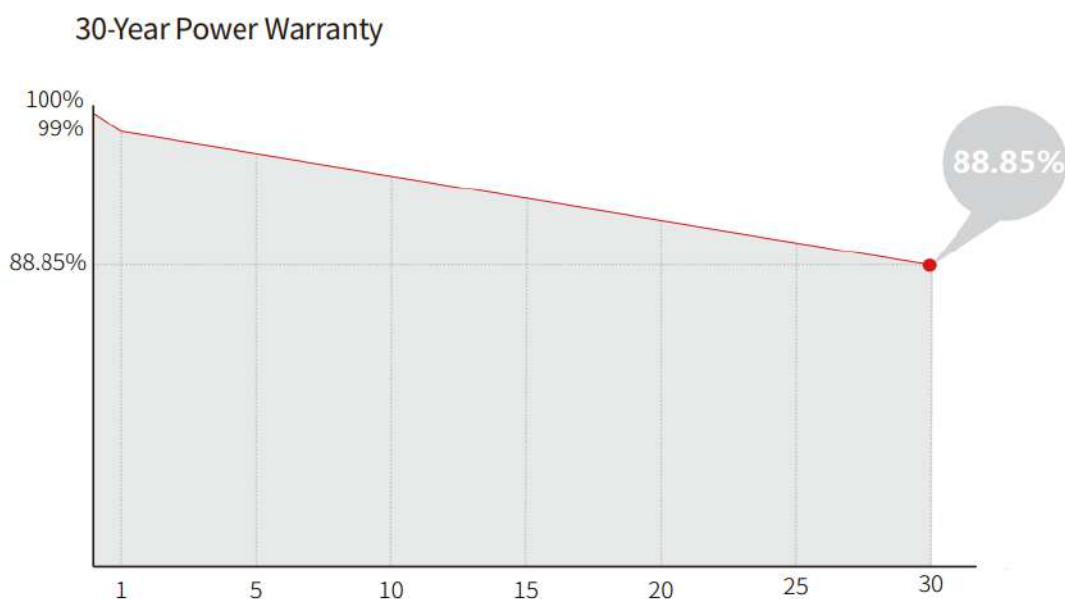


Рисунок 3.2 – Деградація сонячних панелей Longi Yi-Mo x10 Explorer LR7-72HVN-650M від часу використання, років

Таблиця 3.10 – Електричні характеристики сонячних панелей Longi Yi-Mo x10 Explorer LR7-72HVN-650M

№ пп	Параметри	Стандарт	
		STC	NOCT
1	Максимальна потужність, Вт	650	495
2	Напруга холостого ходу U_{oc} , В	53,9	51,23
3	Напруга максимальної потужності U_{MP} , В	44,56	42,35
4	Струм при максимальній потужності I_{mp} , А	14,59	11,69
5	Струм короткого замикання I_{sc} , А	15,29	12,28
6	Температурні коефіцієнти		
7	- P_{max}	-0,26	
8	- U_{oc} , %/°C	-0,2	
9	- I_{sc} , %/°C	+0,05	

Сонячні панелі Longi Yi-Mo x10 Explorer LR7-72HVH-650M по робочому струму та по струму короткого замикання (табл. 3.9) відповідають вхідним параметрам фотовольтаїки обраних в проекті інверторів (табл. 3.5).

За виразом (2.15) розраховуємо оптимальну кількість сонячних панелей у стрінгу і знаходимо фактичну кількість панелей, що максимально наближено відповідають номінальній напрузі MPPT: $n_{\text{пан}} = 8$ шт.

Місце розташування масиву сонячних панелей м. Красилів, Україна. Найнижча температура, що зафіксована в регіоні становить -35°C . За виразом (2.16) розраховуємо максимально можливу напругу стрінга сонячних панелей: $U_{\text{max.стрінга}} = 483$ В. Враховуючи, що максимальна допустима напруга на вході інвертор 500 В, вимога умови виразу (2.17) виконується – тобто на вході фотовольтаїки інвертора напруга в межах допустимої.

Розміщувати сонячні панелі одного стрінга необхідно в однакових умовах – в одному напрямку по азимуту та з одним кутом нахилу. Для домогосподарства з сонячними панелями розміщеними на даху, кожний стрінг повинен повністю розміщуватися на одному схилі. Дахи будівель домогосподарства мають 5 схилів (табл. 3.11). З них схили з порядковими номерами 3 та 5 мають розміри недостатні для розміщення одного стрінга з восьми панелей – максимальна їх місткість 7 панелей.

Таблиця 3.11 – Параметри схилів даху та місткість сонячних панелей

№ схилу	Параметри схилу даху			Максимальна місткість панелей, шт.	Розміщення	
	Азимут	Кут нахилу	Розміри, м		Кількість рядів	Кількість панелей в рядах, шт.
1	98°	35°	11x3	9	1	8
2	98°	20°	11x5	18	2	8+8
3	189°	55°	6,5x3,5	7	2	5+2
4	278°	35°	11x5,5	18	2	8+8
5	9°	55°	6,5x3,5	7	2	5+2

Для обидвох варіантів стрінгів – на 8 та 7 панелей – розраховуємо:

- номінальну напругу (2.18);
- максимальну підключену потужність до MPPT (2.20);
- максимальну підключену потужність PV до інвертора (2.21).

Таблиця 3.12 – Параметри сонячних масивів енергосистеми домогосподарства

Параметри	Умови стандарту	
	STC	NOCT
Стрінг на 7 панелей		
Номінальна напруга, В	312	296
Підключена потужність MPPT, Вт	4 551	3 466
Стрінг на 8 панелей		
Номінальна напруга, В	356	339
Підключена потужність MPPT, Вт	5 201	3 961
Підключена потужність PV до інвертора, Вт		
7+7 панелей	9 102	6 931
7+8 панелей	9 752	7 426
8+8 панелей	10 402	7 921

Напруга на вході MPP трекера відповідає робочому діапазону (табл. 3.5) при підключенні як стрінга з семи панелей так і стрінга із восьми панелей. Підключена потужність знаходиться в межах паспортних даних інвертора SUN-6K-SG05LP1-EU-AM2-P для всіх комбінацій стрінгів із семи та восьми панелей. Для інвертора SUN-5K-SG05LP1-EU-AM2-P при комбінації двох стрінгів із восьми панелей вхідна потужність є надлишковою. Використання п'ятикіловатного інвертора зменшить ефективність використання фотовольтаїчної енергії розрахованого масиву сонячних панелей, порівняно з шестикіловатним. Комбінації стрінгів «7+7» та «8+7» для п'ятикіловатного інвертора відповідає його паспортним даним.

Оцінюємо можливу генерацію електроенергії СЕС домогосподарства в калькуляторі PVWatts. Вибираємо дані сонячних ресурсів, що відповідають розміщенню СЕС. За картою калькулятора PVWatts, визначено дані про погоду NSRDB: локація елемента сітки, яка відповідає місцю розташування домогосподарства – Хмельницька область, Україна, широта 49,65°, довгота 26,94°.

Досліджуємо сонячні масиви з семи панелей для схилів 3 та 5.

Вносимо в калькулятор PVWatts дані про систему:

1. Потужність сонячного масиву стрінга для умов STC – 4,55 кВт;
2. Тип панелі – преміум;
3. Тип масиву – нерухома систему;
4. Втрати системи;
5. Нахил панелей в градусах;
6. Орієнтація панелей по азимуту в градусах.

В пункті 4 «Втрати системи», за допомогою калькулятора втрат коригуємо втрати генерації від деградації сонячних панелей із віком відповідно до паспортних даних. Значення втрат від деградації з віком панелей беремо співставне з терміном використання інвертора та АБ (для 10 років) – це 1 % для першого року та 3,2 % для наступних (рис. 3.2).

В пунктах 5 та 6 вносимо дані для відповідних схилів даху (табл. 3.10). В розширених параметрах коригуємо дані у відповідності з обраним в проекті обладнанням:

- Коефіцієнт відношення постійного та змінного струму (2.22) – 1,517;
- Ефективність інвертора – 96.5%;
- Односторонні сонячні панелі.

Для кожного схилу даху вводимо відповідні значення нахилу на орієнтації по азимуту. Отримані результати дослідження заносимо у табл. 3.13.

Досліджуємо сонячні масиви з восьми панелей для схилів 1, 2 та 4.

Змінюємо потужність сонячного масиву стрінга для умов STC – 5,2 кВт.

Вводимо в калькулятор коефіцієнт відношення постійного та змінного струму (2.22) – 1,733. Для кожного схилу даху вводимо відповідні значення нахилу на орієнтації по азимуту. Отримані результати дослідження заносимо у табл. 3.13.

Таблиця 3.13 – Моделювання генерації фотовольтаїки у PVWatts

Місяць	Енергія змінного струму, кВт·год., отриманого від електричного кола сонячних панелей розміщених на схилі				
	1	2	3	4	5
Січень	103	107	155	89	38
Лютий	178	184	235	150	50
Березень	344	370	368	311	99
Квітень	441	474	403	393	131
Травень	585	637	490	551	251
Червень	614	659	474	560	289
Липень	605	661	516	613	261
Серпень	535	580	495	518	161
Вересень	394	415	419	339	87
Жовтень	234	240	310	196	51
Листопад	76	78	111	61	23
Грудень	49	54	80	54	25
За рік	4 158	4 459	4 056	3 835	1 466

На рис. 3.3 показано гістограму споживання електроенергії домогосподарством в розрізі місяців та відповідну потенційну генерацію одного стрінга розміщеного на різних схилах. За результатами моделювання генерації електроенергії масивами сонячних панелей, розміщених на схилах дахів домогосподарства, панелі доцільно монтувати на схилах №3 та №2. Хоча за рік на схилі №1 генерація більша за генерацію на схилі №3, останній є доцільнішим з точки зору більш рівномірної генерації в розрізі місяців – вона більша у зимовий період. При цьому стрінг на схилі №3 має на одну панель менше. Схил №5 не доцільно розглядати для розміщення сонячних панелей.

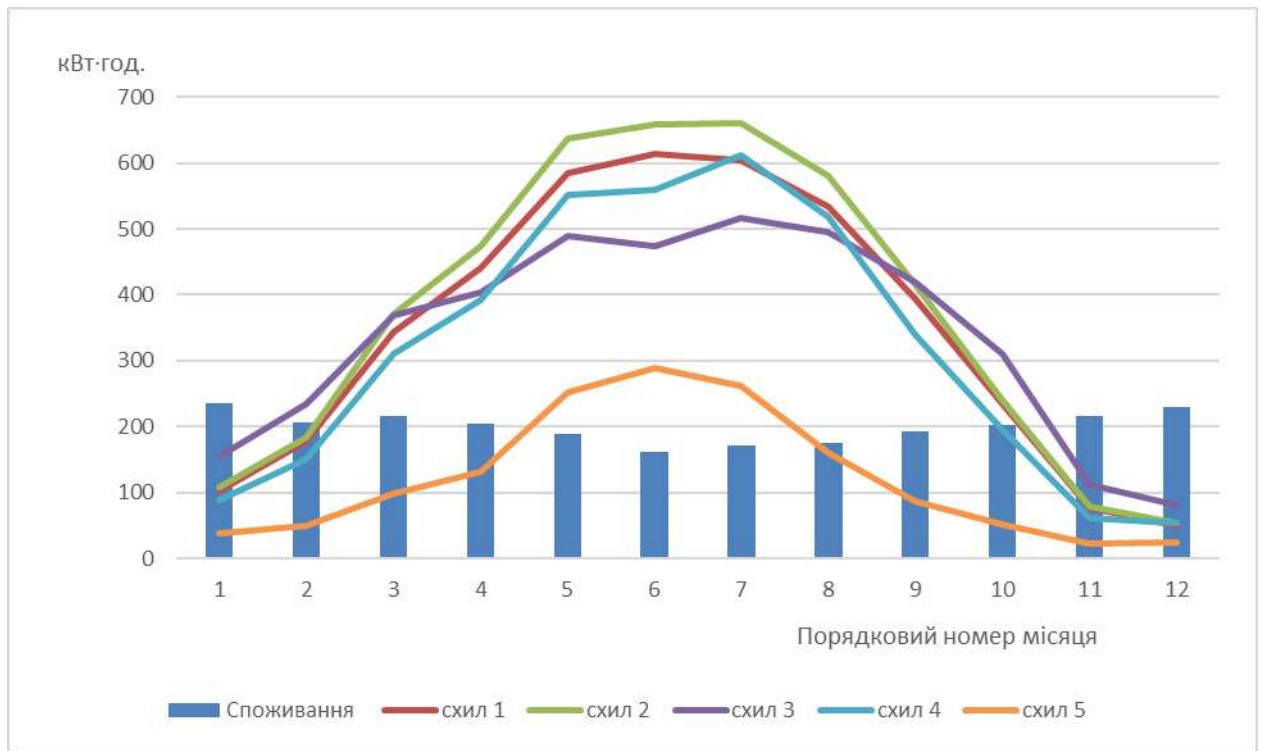


Рисунок 3.3 – Споживання домогосподарством електроенергії та потенційні можливості генерації одного стрінга сонячних панелей

На рис. 3.3 видно, що масив сонячних панелей, що розміщений на схилі №3 може забезпечити домогосподарство електроенергією протягом найбільш тривалого періоду в році. Дефіцит власної генерації буде лише у періоді листопад – січень.

3.5 Розрахунок потужності генератора з двигуном внутрішнього згоряння

Потужність генератора визначаємо з максимального середньодобового споживання електроенергії домогосподарством (Рис. 3.4) – 7,61 кВт·год. В розрахунках приймаєм:

- коефіцієнт завантаження генератора 70%;
- Тривалість роботи генератора протягом доби 5 год. (Для нормального робочого дня, це 1 год. вранці та 4 год. ввечері);

- коефіцієнт запасу потужності на втрати в інверторі та АБ при накопиченні електроенергії – 1,15.

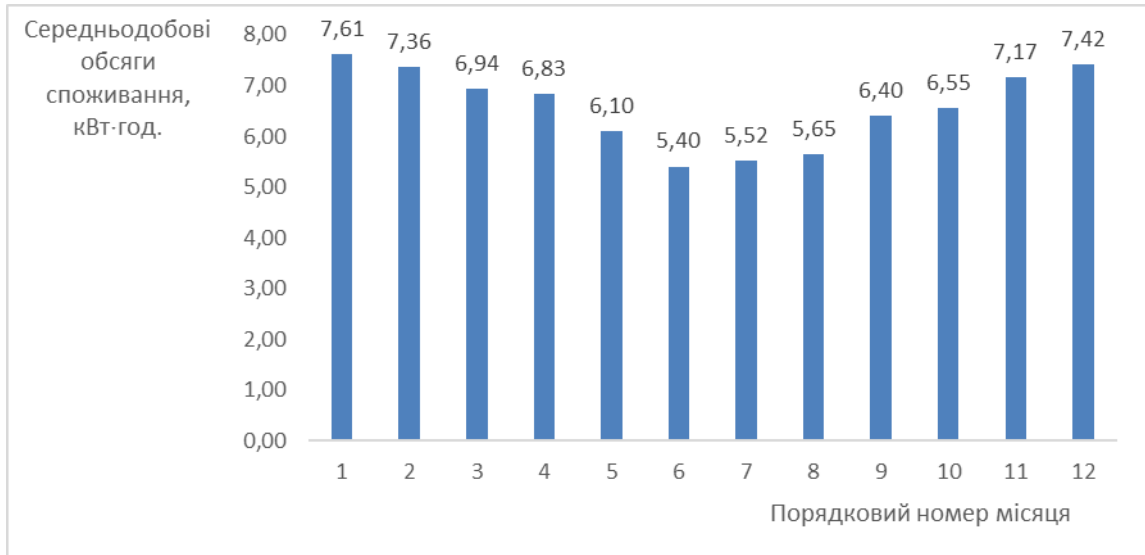


Рисунок 3.4 – Середньодобові обсяги споживання електроенергії домогосподарством

За виразом (2.7) визначаємо мінімально необхідну номінальну потужність генератора $P_{\text{ном.ген}} = 2,5$ кВт. Генератори такої потужності пропонуються з бензиновим та дизельним двигунами. З врахуванням змодельованої вище генерації фотовольтаїчної системи, найбільш ймовірно задіяння генератора буде необхідним в зимовий період. Для більш надійного пуску генератора в холодну пору кращим буде бензиновий рушій. Додатковою перевагою бензинового генератора є його тихіша робота. Основним критерієм вибору бензинового побутового генератора надійний виробник. За характеристиками, генератор має бути однофазним, з синхронним альтернатором, обладнаний блоком AVR. Інверторні генератори переваги не матимуть – при використанні генератора в комплексі з інвертором та АБ він буде достатньо завантажений весь час роботи. Вибраний в проекті гібридний інвертор має окремий генераторний вхід, потужність якого можна обмежити в налаштуваннях інвертора. Це захистить генератор від перевантажень, а

дефіцит потужності буде покриватися інвертором за рахунок накопиченої в АБ електроенергії.

Таблиця 3.14 – Типові характеристики побутових генераторів

Параметри	Loncin LC 3500 AS	KONNER & SOHNER KS 7000E	KONNER & SOHNER KS 6100HDE
Тип пального	Бензин	Бензин	Дизель
Кількість фаз	Одна	Одна	Одна
Номінальна напруга, В	230	220	220
Номінальна потужність, кВт	2,8	5	5
Максимальна потужність, кВт	3,1	5,5	5,5
Максимальний струм, А	13.5	25	25
Регулювання напруги	AVR	AVR	AVR
Об'єм масла в двигуні, л	0.6	1,1	1.65
Клас захисту	IP23	IP23	IP23
Тип альтернатора	Синхронний	Синхронний	Синхронний
Орієнтовна ціна, грн.	18 000	36 700	61 100

3.6 Розробка схеми системи комбінованого електроживлення

Ядром електричної схеми комбінованої системи електропостачання (рис. 3.5) є гібридний інвертор INV. До централізованої мережі 230 В інвертор підключено після реле напруги KV1 через автоматичний вимикач QF2. Вхід інвертора («GRID») захищений обмежувачем перенапруг FV1. Вихід інвертора («LOAD») захищено від перевантаження автоматичним вимикачем QF3. До входу «GEN» інвертора, через вимикач навантаження QS4, підключено вихід з генератора. Генератор захищений від перевантаження автоматичним вимикачем QF4. Обладнання системи

захищене від можливого відхилення напруги генератора за допомогою реле напруги KV2, та від можливих імпульсів обмежувачем перенапруг FV2.

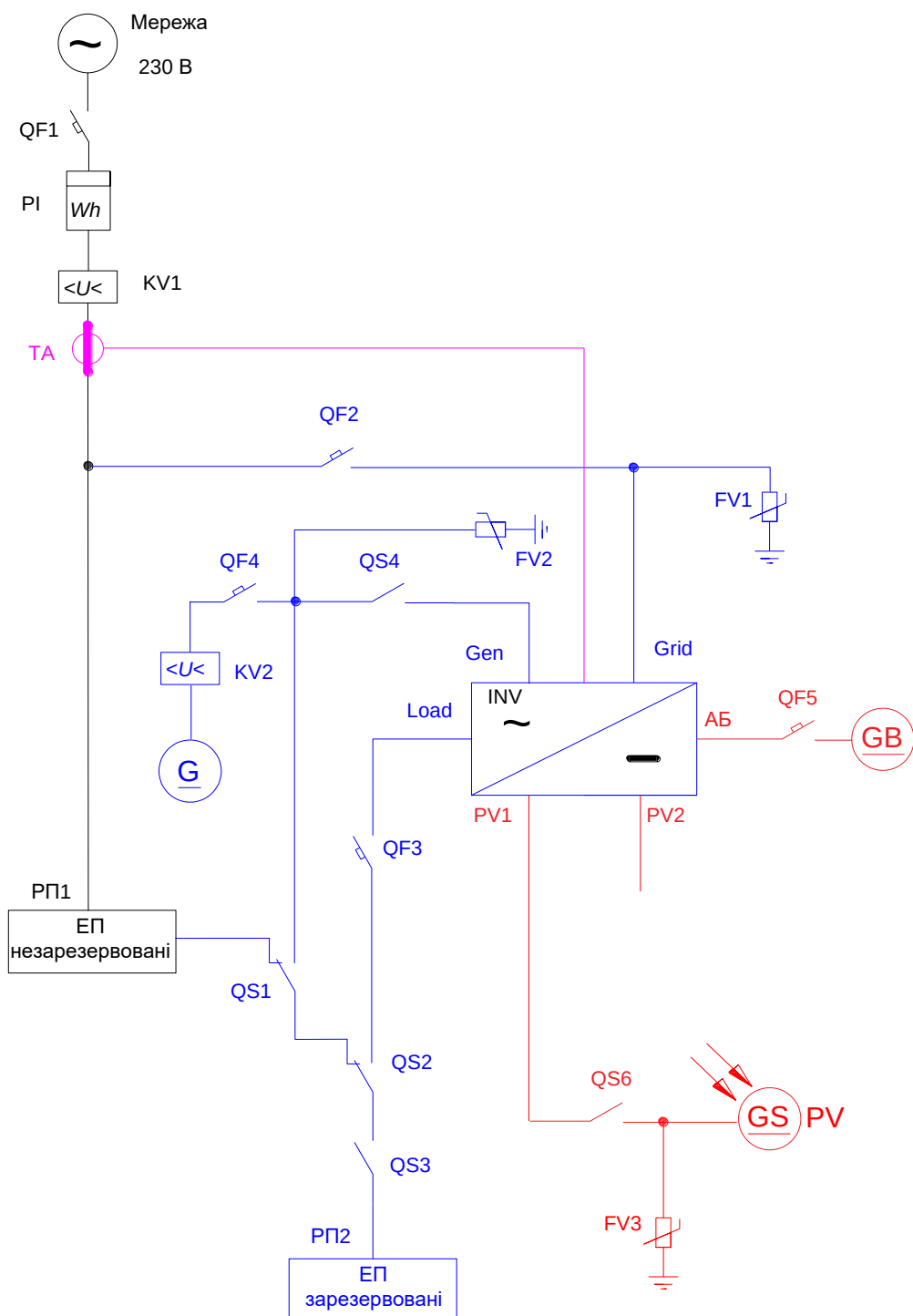


Рисунок 3.5 – Однолінійна схема комбінованого електроживлення домогосподарства

Таблиця 3.15 – Обладнання системи комбінованого електроживлення

Поз.	Найменування	К-сть
QF1	Автоматичний вимикач ввідний	1
PI	Лічильник електроенергії	1
KV1	Реле напруги вхідне в мережу домогосподарства	1
РП1	Розподільний пункт незарезервованої частини мережі	1
Обладнання зарезервованої частини мережі		
INV	Гібридний інвертор DEYE SUN-6K-SG05LP1-EU-AM2-P	1
ТА	Трансформатор струму (в комплекті інвертора)	1
G	Генератор Loncin LC 3500 AS	1
GB	Акумуляторна батарея DEYE SE-F12	1
PV	Сонячні панелі Longi Yi-Mo x10 Explorer LR7-72HVN-650M	7
KV1	Реле напруги виходу генератора, 230В, 40 А	1
FV1, FV2	Обмежувачі перенапруги ОПН AC 280 В Тип 2	2
FV3	Обмежувачі перенапруги ОПН DC 500 В Тип 2	1
РП2	Розподільний пункт зарезервованої частини мережі	1

Таблиця 3.16 – Автоматичні вимикачі системи комбінованого електроживлення

Поз.	Найменування	Тип напруги	Кількість полюсів	Часово-струмова характеристика	Робочий струм, А
QF2	Автоматичний вимикач вводу інвертора	AC	2	C	40
QF3	Автоматичний вимикач виходу інвертора	AC	2	B	40
QF4	Автоматичний вимикач виходу генератора	AC	2	C	16
QF5	Автоматичний вимикач АБ	DC	2	C	150

Таблиця 3.17 – Вимикачі та перемикачі ручної комутації

Поз.	Найменування	Категорія	Кількість полюсів	Робочий струм, А
QS1	Перемикач	АС-20	2	40
QS2	Перемикач	АС-20	2	40
QS3	Вимикач навантаження	АС-22	2	40
QS4	Вимикач навантаження	АС-22	2	40
QS6	Вимикач навантаження	DC-22	2	20

Вибір автоматичних вимикачів здійснюється за родом струму, часово-струмовою характеристикою та робочим струмом. Для побутової мережі використовується часово-струмова характеристика «С». Вихід інвертора захищено автоматичним вимикачем з часово-струмовою характеристикою «В», що забезпечить менший час відключення при значному перевантаженні. Робочий струм автоматичних вимикачів визначається за вихідними та вхідними паспортними струмами енергетичного обладнання системи.

Перемикачі та вимикачі навантаження вибрано за категорією застосування комутаційних апаратів [2]. Робочі струми мають бути більшими за комутований струм.

До входу інвертор «АБ» підключена акумуляторна батарея, яка захищена від перевантаження автоматичним вимикачем QF5.

В схемі задіяний один з двох МРР трекерів. До входу фотовольтаїки інвертора PV1 через вимикач навантаження QS6 підключено масив сонячних панелей PV. Вхід інвертора захищено обмежувачем перенапруг FV3 від можливих грозових розрядів.

При підключенні всіх джерел живлення інвертора, він автоматично перерозподіляє електроенергію на вихід «LOAD» в залежності від установлених пріоритетів в налаштуваннях інвертора. Заряджання АБ здійснюється автоматично, при наявності живлення мінімум одного джерела. Для роботи інвертора необхідне мінімум одне джерело живлення – можлива будь-яка їх комбінація.

Ручна комутація джерел живлення зарезервованої мережі здійснюється перемикачами QS1 та QS2. Для ручної комутації необхідно вимкнути навантаження зарезервованої мережі вимикачем навантаження QS3. Перемикачем QS2 здійснюється комутація «інвертор – централізована мережа», перемикач QS3 дозволяє перемикатися між генератором та централізованою мережею. Зарезервована мережа домогосподарства може бути заживлена засобами ручної комутації від інвертора, від генератора або від централізованої мережі.

В схемі передбачено трансформатор струму ТА увімкнений первинною обмоткою між лічильником електричної енергії на ввіді та мережею домогосподарства, а вторинною під'єднано до відповідного роз'єму інвертора. При активації в налаштуваннях інвертора «нульового експорту», надлишки електроенергії від сонячних панелей будуть постачатися в незарезервовану мережу домогосподарства, не надходячи при цьому в централізовану мережу.

3.7 Економічні показники розробленої системи комбінованого електроживлення

Основними економічними чинниками, що впливають на вибір джерела постачання електроенергії є її вартість.

Складаємо калькуляцію електроенергії отриманої від побутового генератора, використовуючи вирази (2.25 – 2.29) – табл. 3.18.

Розраховуємо вартість електроенергії накопиченої з мережі. Для розрахунку використаємо соціальну ціну електроенергії для населення та ринкову, як перспективу росту ціни. Розрахунки проводимо для літій-залізофосфатних акумуляторних батарей. За виразом (2.31) розраховуємо амортизацію обладнання ДБЖ – інвертора та АБ (табл. 3.19).

Таблиця 3.18 – Розрахунок вартості електроенергії побутового генератора

Показник	Одиниці виміру	Дизель-генератор	Бензиновий генератор
Номінальна потужність	кВт	5	2,8
Коефіцієнт завантаження	%	75%	70%
Потужність генерування	кВт	3,75	1,96
Витрата пального	л/кВт·год	0,37	0,59
Ціна пального	Грн/л	83	70
Об'єм масла	л/кВт·год	1,65	0,6
Ціна масла	Грн/л	300	300
Періодичність заміни масла	Мото-годин	100	50
Ціна генератора	Грн	61100	18000
Очікуваний моторесурс	Мото-годин	4000	2000
Амортизаційні відрахування	Грн./мото-год	15,28	9,00
Пальне	Грн./кВт·год	30,71	41,3
Масило	Грн./кВт·год	1,32	1,84
Амортизація	Грн./кВт·год	4,07	4,59
Вартість електроенергії	Грн./кВт·год	36,10	47,73

Таблиця 3.19 – Розрахунок амортизації інвертора та АБ

Параметри	Значення
Ціна акумуляторної батареї DEYE SE-F12 грн	75000
Енергопропускна здатність, кВт·год	37000
Амортизація акумуляторної батареї, грн./кВт·год	2,03
Ціна інвертора, грн	34000
Корисний термін використання, років	10
Річний обсяг споживання електроенергії, кВт·год	2399
Амортизація інвертора SUN-6K-SG05LP1, грн./кВт·год	1,42
Всього амортизація, грн./кВт·год	3,44

За виразом (2.30) витрати на купівлю електричної енергії для накопичувача та розраховуємо повну вартість електроенергії (2.32).

Таблиця 3.20 – Вартість електроенергії при застосування ДБЖ

Параметри	Соціальна ціна	Ринкова ціна
Ціна купівлі електроенергії, грн./кВт·год	4,32	14,18
Ефективність інвертора, %	96,50%	96,50%
Ефективність акумуляторної батареї, %	95,00%	95,00%
Змінна вартість накопиченої електроенергії, грн./кВт·год	4,71	15,47
Повна вартість електроенергії накопичувача, грн./кВт·год	8,16	18,91

Розраховуємо маржинальні витрати на улаштування масиву сонячних панелей (2.33) і повну вартість електроенергії СЕС (2.34).

Таблиця 3.21 – Розрахунок вартості електроенергії власної СЕС

Параметри	Значення
Ціна сонячних панелей, грн.	40250
Корисний термін використання, років	30
Річний обсяг споживання електроенергії, кВт·год	2399
Маржинальні витрати на сонячні панелі, грн./кВт·год	0,56
Вартість електроенергії власної СЕС, грн./кВт·год	4,00

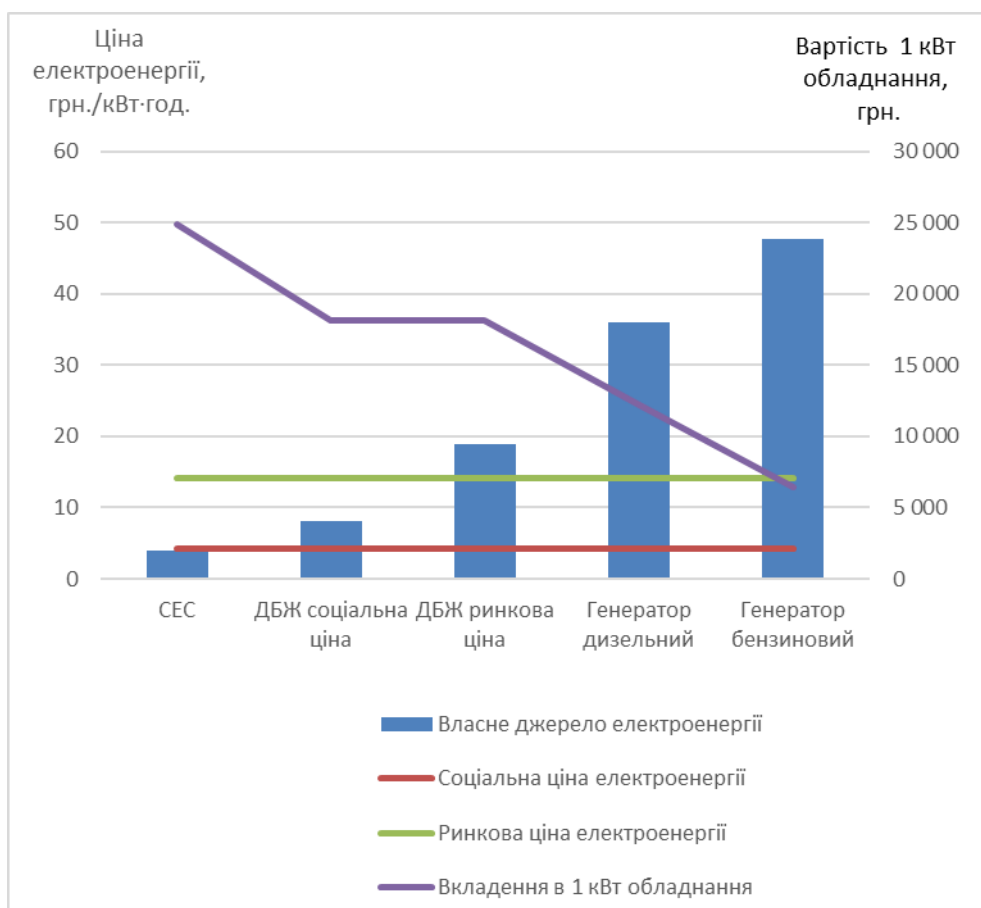


Рисунок 3.6 – Порівняння вартості електроенергії з різних джерел та початкових вкладень в обладнання

Аналіз вартості електроенергії за графіками рис. 3.6 показує, що ціна електроенергії від побутових електрогенераторів не може конкурувати з електроенергією від централізованої мережі. Використання ДБЖ закономірно підвищує вартість електроенергії – вона завжди буде більшою за ціну електропостачальної компанії. Додавання до ДБЖ масиву сонячних панелей дозволяє максимально знизити вартість електроенергії, яка при цьому не буде в майбутньому залежати від вартості енергоносіїв на ринку. В протиположному напрямку вартості електроенергії, сума необхідних початкових вкладень має протилежний тренд.

3.8 Висновки

Аналіз даних електричного навантаження домогосподарства дозволив створити дві незалежні мережі – зарезервовану та незарезервовану. Визначено необхідну потужність зарезервованої мережі, на основі чого вибрано ключове обладнання – гібридний інвертор – потужність якого повністю забезпечить живлення важливих для домогосподарства електроприймачів. Вибір потужності інвертора 6 кВт здійснено з врахуванням економічних факторів. У відповідності з вибраним інвертором, розглянуті варіанти АБ, з яких вибір здійснено на користь літій-залізо-фосфатної АБ. З урахуванням необхідних розрядних струмів та обсягів накопичення електроенергії вибрано АБ ємністю 11,8 кВт·год. Для комбінованої мережі розраховані масиви сонячних панелей, що своїми характеристиками відповідають вхідним параметрам МРР трекерів інвертора. Розглянуто можливі варіанти установки сонячних панелей на доступних в домогосподарстві схилах дахів. Проведено аналіз виробітку електроенергії в залежності від місця монтажу сонячних панелей та вибрано найбільш доцільні схили дахів. Шляхом порівняння фотовольтаїчної генерації та її споживанням домогосподарством обрано доцільну кількість стрінгів сонячних панелей у системі. Як резервне джерело живлення на випадок повного тривалого відключення обрано бензиновий генератор та розраховано його мінімальну номінальну потужність не менше 2,5 кВт.

Для домогосподарства розроблено електричну схему мережі, в якій задіяні всі обрані джерела енергії в допомогу до централізованої мережі. В нормальних умовах зарезервована мережа працює в автоматичному режимі. При необхідності можна перейти на ручний режим комутації джерел живлення для зарезервованої мережі. Запропонована резервна мережа має перспективи для подальшого розширення. В залежності від зміни характеру навантаження домогосподарства у майбутньому, є можливість додати фотовольтаїку до другого МРР трекера інвертора, або при необхідності збільшення потужності, до існуючого гібридного інвертора додати додаткові, що в додачу до

загального збільшення потужності розширить можливості по нарощуванню сонячної електрогенерації. Запропонована в роботі АБ дозволяє їх паралельне підключення до 32 шт., що дає змогу значно збільшити обсяги накопичуваної енергії.

Економічні розрахунки показують, що найбільш доцільною є СЕС з АБ. На відміну від БДЖ, СЕС є самодостатньою в забезпеченні власних потреб та періодично поповнює свої запаси електроенергії без обов'язкового постачання з централізованої електромережі. Моделювання електрогенерації СЕС в калькуляторі PVWatts, показує, що за рахунок фотовольтаїки домогосподарство може бути повністю забезпечене електроенергією із лютого по жовтень.

Улаштування запропонованої комбінованої системи електроживлення домогосподарства може бути поетапним – на першому етапі достатньо встановити гібридний інвертор з АБ. В подальшому систему можна доповнювати масивами сонячних панелей та генератором, в будь-якій послідовності.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА

Технічний прогрес підвищує планку рівню добробуту населення. Разом з тим він приносить в життя певні ризики, пов'язані з небезпекою для здоров'я та життя працівників, які задіяні у виробничих процесах та обслуговуванні обладнання, а також для користувачів, які використовують обладнання в побутовому середовищі.

4.1. Охорона праці

Виконання робіт по монтажу та обслуговуванню електричного обладнання несе ризики небезпеки ураження струмом, падіння з висоти, отримання опіків. Електромонтажні роботи відносять до робіт з підвищеною небезпекою. До електромонтажних робіт можуть допускатися особи, яким виповнилося не менше 18 років та які пройшли медичний огляд за результатами якого були визнані придатними до виконання зазначеної роботи. Виконавці електромонтажних робіт повинні мати достатню кваліфікацію та навички для виконання роботи. Електромонтери повинні мати посвідчення кваліфікаційної групи з електробезпеки не нижче третьої. Для отримання посвідчення з електробезпеки працівники повинні пройти відповідне навчання та успішно скласти кваліфікаційні іспити. Особи задіяні при монтажу та обслуговуванню електричного обладнання, перед допуском до роботи повинні пройти відповідний інструктаж з охорони праці:

- Для новоприйнятих працівників – вступний інструктаж та первинний інструктаж на робочому місці;
- Повторний інструктаж, який проводять кожні три місяці при виконанні робіт з підвищеною небезпекою, та кожні шість місяців для робіт без підвищеної небезпеки;
- Позаплановий інструктаж, який проводять при зміні правових документів з охорони праці, зміні обладнання, приладів, інструментів, а також

при тривалості перерви виконання роботи, що пов'язана з підвищеною небезпекою, більше 30 календарних днів, та 60 календарних днів для інших видів робіт, а також при виникненні нещасних випадків, аварій чи пожеж, які сталися внаслідок порушення працівником нормативно-правових документів з охорони праці;

- Цільовий інструктаж проводять при необхідності задіяння працівників для ліквідації аварій та наслідків стихійного лиха, а також перед виконанням робіт, що законодавчо вимагають оформлення наряду-допуску, наказу або розпорядження.

Всі перераховані види інструктажів мають завершуватися перевіркою відповідних знань. Проведення інструктажів записують у журналах реєстрації відповідних інструктажів, які мають бути пронумеровані, прошнуровані та скріплені печаткою.

Після проведення первинного інструктажу на робочому місці, електромонтер має пройти стажування під керівництвом досвідчених та кваліфікованих електромонтера, призначеного наказом по організації.

Електромонтер зобов'язаний працювати в спецодязі та використовувати інші засоби індивідуального захисту. При обслуговуванні електрообладнання необхідно використовувати діелектричні рукавички, килими, діелектричне взуття, інструменти із заізольованими ручками. Усі засоби захисту повинні проходити періодичну перевірку і мати клеймо з позначенням наступної перевірки.

Монтажні та ремонтні роботи в електричних мережах, підключення та відключення електрообладнання від мережі має здійснюватися за умови попередньо знятої напруги.

У виключних випадках дозволяється проводити роботи без зняття напруги в електроустановках з напругою до 500 В при виконанні наступних умов:

- роботи повинні виконуватися не менше, ніж двома електриками;

- працювати необхідно в діелектричному взутті або на діелектричному коврику;
- сусідні струмоведучі частини, що знаходяться під напругою мають бути відгороджені діелектричним матеріалом;
- рукави одягу мають бути опущені та застебнуті;
- інструменти повинні бути з ізольованими ручками.

Для освітлення місця ремонту дозволяється використовувати переносні світильники напругою не вище 42 В, а у особливо небезпечних місцях – 12 В.

4.2 Пожежна безпека

В комбінованій системі електропостачання використовуються компоненти з підвищеною пожежною безпекою.

Найбільший ступінь небезпеки становить бензиновий генератор. Відстань від генератора до суміжних об'єктів повинна бути не меншою від встановленої Правилами пожежної безпеки в Україні. В комбінованій системі електропостачання даної роботи передбачено використання електрогенератора з номінальною потужністю 2,8 кВт, який має паливний бак 15 л. Місце встановлення генератора має бути на відстані не менше 1 м до суцільної стіни та не менше 6 м до інших стін (табл. 4.1) [4]. Установка генератора в закритих приміщеннях або підвалах категорично заборонена. Бензин для бензинового генератора має зберігатися в пластикових або металевих каністрах призначених для паливно-мастильних матеріалів. Заповнення каністр має бути не повним для можливого розширення пального. Зберігати каністри необхідно в підсобних будівлях. Зберігання каністр з паливом у будинках та підвалах заборонено.

Доливання пального в генератор дозволяється лише після повної його зупинки та охолодження двигуна для попередження займання палива, що може попасти на глушник.

Таблиця 4.1 – Протипожежні відстані від встановленого електрогенеруючого обладнання до суміжних об'єктів.

№ з/п	Номінальна потужність електрогенеруючого обладнання, кВт (об'єм паливного бака (балона))	Мінімальна протипожежна відстань, м	
		до суцільних стін будівель, виконаних із негорючих матеріалів	до інших стін будівель
1	до 1,0 кВт включно (до 5 л)	1	4
2	від 1,01 до 3,0 кВт включно (до 15 л)	1	6
3	від 3,01 до 6,0 кВт включно (до 20 л)	4	8
4	від 6,01 до 10 кВт включно (до 50 л)	6	10
5	від 10,01 до 20 кВт включно (до 100 л)	10	12

Бензиновий генератор є джерелом підвищеної пожежної небезпеки. Генератори можуть загорятися внаслідок витіку пального, перегріву чи короткого замикання. Для тушіння можливої пожежі біля генератора в доступному місці має бути вогнегасник. Заборонено тушити генератор водою. Для тушіння генератора підходять порошкові та вуглекислотні вогнегасники. Для надійної роботи, вогнегасники мають проходити щорічну перевірку.

Для генераторів потужністю до 5 кВт вогнегасник має бути місткістю не менше 2 кг (ВП-2). Потужніші генератори потребують використання вогнегасників з більшим об'ємом – ВП-5 та більше.

4.3 Висновки

Дотримання електротехнічним персоналом правил з охорони праці дозволить попередити виникнення нещасних випадків на робочому місці. Періодичність інструктажів та відповідної перевірки знань з охорони праці, проведення навчань сприяє підвищенню рівня охорони праці. Це в поєднанні

з повіркою індивідуальних засобів захисту, дисципліни трудового колективу по їх використанню, перевірка ізоляції інструментів створює умови для безпечного виконання трудових обов'язків.

Дотримання правил протипожежної безпеки є основою по збереженню життя і здоров'я людей та майна, успішного попередження виникнення пожеж. Визначено мінімальну безпечну відстань від місця розташування електрогенеруючої установки до найближчих будівель та правила безпечного заправлення. Для тушіння можливого загоряння генераторної установки передбачено вогнегасник з відповідними характеристиками.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи здійснено дослідження потреб в резервному електропостачанні приватних домогосподарств. В ході вирішення поставленої задачі по підвищенню надійності електропостачання вивчено різновиди можливих для використання в домогосподарствах систем резервного живлення. У першому розділі проведено аналіз використання для резервного живлення генераторів з двигуном внутрішнього згоряння, потужних ДБЖ із зовнішніми АБ великої ємності, масивів сонячних панелей в поєднанні з інвертором. Розглянуто безпечні способи підключення джерел резервного живлення до домашньої мережі.

В методичному розділі викладено порядок розрахунків складових частин резервної системи електропостачання з визначенням їхніх мінімально необхідних характеристик:

- за потужністю для генераторів та інверторів;
- за енергоємністю для АБ;
- за напругою та потужністю для масивів сонячних панелей.

В дослідницькому розділі роботи на прикладі домогосподарства виділено частину електричного навантаження, що має життєво важливе значення для побуту. За визначеними потребами розраховані мінімальну потужність основної складової системи комбінованого електропостачання – гібридного інвертора. З врахуванням необхідної потужності методом порівняльного аналізу економічної оцінки ряду гібридних інверторів обрано найбільш раціональний варіант. За потребами інвертора та необхідної тривалості автономної роботи системи комбінованого електропостачання розраховано параметри АБ за допустимим розрядним струмом та ємністю. У відповідності із характеристиками МРР трекера інвертора з урахуванням паспортних параметрів сонячних батарей розраховано можливу кількість панелей в стрінгу та проведено коригування їх кількості до можливого вмісту

на схилах дахів будівель домогосподарства. Досліджено можливі обсяги генерації в залежності від розміщення сонячних панелей на доступних у домогосподарстві схилах дахів. На випадок довготривалих відключень в періоди малої фотовольтаїчної генерації в системі комбінованого електропостачання передбачено генератор, для якого визначено доцільний тип та розраховано мінімально необхідну потужність. Розроблено схему приєднання всіх складових системи комбінованого електропостачання до мережі домогосподарства. Система може працювати в режимах автоматичної та ручної комутації вибору джерела електроенергії.

Впровадження системи комбінованого електропостачання може здійснюватися поетапно – від ДБЖ або генератора до повноцінної системи з фотовольтаїчними масивами. Економічний аналіз вартості електроенергії підтверджує доцільність побудови повної системи комбінованого електроживлення домогосподарства.

В роботі розглянуто питання охорони праці при здійсненні електромонтажних робіт, як основу попередження нещасних випадків при здійсненні трудової діяльності. Розглянуто питання забезпечення норм протипожежної безпеки для облаштування та експлуатації комбінованої системи електроживлення.

Розроблена система живлення, при необхідності, може бути модернізованою без потреби перебудови. Потужність системи нарощується за рахунок паралельного підключення додаткових інверторів, обсяги накопичення електроенергії можна збільшити за рахунок паралельного підключення АБ, потужності та обсяги сонячної генерації – підключенням додаткових стрінгів сонячних панелей.

Модель системи є придатною для улаштування на інших домогосподарствах з урахуванням їх потреб та унеможливорює контакт користувача із струмопровідними частинами під напругою при нормальному режимі роботи системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бондаренко Є.А. Охорона праці в електроенергетиці. Навчальний посібник. Вінниця, ВНТУ 2022. -138с.
2. Національний стандарт України. Пристрої комплектні розподільчі низьковольтні. Частина 3. Вимикачі, роз'єднувачі, вимикачі-роз'єднувачі та комбінації запобіжник-комутаційний апарат. ДСТУ ІЕС 60947-3:2010. Київ, Держспоживстандарт України, 2009. -83с.
3. Основи сонячної електроенергетики. Навчальний посібник / В.В. Курак, О.В. Андропова, Н.Л. Дон. – Херсон, 2024. – 348 с.
4. Правила Пожежної безпеки в Україні. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15#Text> (дата звернення 06.05.2026).
5. Види акумуляторів: як вибрати АКБ для резервного живлення? URL: <https://lanmarket.ua/ua/stats/vidi-akumulyatoriv-yak-vibrati-akb-dlya-rezervnogo-zhivlennya/> (дата звернення 06.03.2026).
6. Закон України Про охорону праці. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (дата звернення 05.05.2026).
7. Інструкції DEYE. URL: <https://www.deye-ukraine.com.ua/manual> (дата звернення 23.04.2026).
8. Інструкція з техніки безпеки для сонячних панелей, сонячних інверторів та оптимізаторів для сонячних панелей. URL: https://solar-markets.com.ua/content/files/instruktsiya_z_bezpeky-11460276.pdf (дата звернення 18.05.2026).
9. Калькулятор PVWatts. URL: <https://pvwatts.nlr.gov/pvwatts.php> (дата звернення 22.05.2026).
10. Кінцевий посібник для домашньої сонячної енергетичної системи: від установки до обслуговування. URL: <https://www.beny.com/uk/ultimate-guide-for-home-solar-power-system-from-installation-to-maintenance/> (дата звернення 20.04.2026).

11. Таблица коэффициентов пусковых токов. URL: <https://energopostach.com/puscovie-toki.html> (дата звернення 15.04.2026).
12. Типи акумуляторних батарей. Повний огляд. URL: <https://deps.ua/ua/knowegable-base/reference-information/10591.html#q2-2-3> (дата звернення 11.02.2026).
13. Типи акумуляторів VRLA, AGM та GEL, різниця між ними. URL: <https://energy-gmbh.com.ua/ua/a22332-tipy-akkumulyatrov-vrla.html> (дата звернення 12.02.2026).
14. Як забезпечити автономне енергопостачання будинку за допомогою ВДЕ. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/yak-zabezpechyty-avtonomne-enerhopostachannia-budynku-za-dopomohoiu-vde> (дата звернення 18.02.2026).
15. Як коефіцієнт навантаження дизельного генератора впливає на його термін служби? URL: <https://uk.whjlmech.com/knowledge/how-does-a-diesel-generator-s-load-factor-influence-its-lifespan> (дата звернення 11.03.2026).
16. Який акумулятор краще? URL: <https://energy-gmbh.com.ua/ua/a105690-kakoj-akkumulyator-luchshe.html> (дата звернення 13.02.2026).
17. ESS Solution. URL: https://www.helius.com.ua/wp-content/uploads/deye-se-f5f5-prof5-plusf12f12-maxf16f16-max-series_brochure-20260202v1.1.pdf (дата звернення 10.04.2026).
18. Hybrid Inverter SUN-(3.6-10)K-SG05LP1-EU-AM2-P. User Manual. URL: <https://www.nkon.nl/ua/amfile/file/download/file/935/product/5913/> (дата звернення 10.04.2026).
19. Konner Sohner. Генератори. URL: <https://ks-ukraine.com.ua/generatory.html> (дата звернення 27.04.2026).
20. Longi Yi-Mo x10 Explorer LR7-72HVVH-650M. Технічний паспорт. URL: https://static.longi.com/LR_7_72_HVVH_630_650_M_30_30_and_15_Explorer_BGV_02_20241118_EN_Draft_426c93d9d1.pdf (дата звернення 16.04.2026).