

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Система керування резервним джерелом живлення приватного будинку

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи ЕТс-41
спеціальності 141 – Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

| | | |
|-------------------|----------|------------------------------------------|
| | (підпис) | Слободян К. В. (прізвище та ініціали) |
| Керівник | (підпис) | Мовчан Л. Т. (прізвище та ініціали) |
| Нормоконтроль | (підпис) | Коваль В. П. (прізвище та ініціали) |
| Завідувач кафедри | (підпис) | Коваль В. П. (прізвище та ініціали) |
| Рецензент | (підпис) | Козбур І. Р. (прізвище та ініціали) |

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс–41 - Т.: ТНТУ, 2024.

Стор. 54; рис. 27; табл. 8;; джерел 11; додатків 0.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Система керування резервним джерелом живлення приватного будинку».

Метою даної роботи є створення проекту системи керування резервними джерелами живлення на основі джерел альтернативної енергії.

Проведено вибір сонячної та акумуляторної батареї для проектування системи керування резервним джерелом живлення приватного будинку, базуючись на аналізі електроспоживання будинку. Розраховано основні параметри фотоелектричної установки та батареї акумуляторів.

Моделювання роботи двох типів стабілізаторів релейний регулятор напруги та регулятор з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) показало що релейний регулятор підтримує вихідну напругу в діапазоні від 221,1 до 231,6 В з коефіцієнтом гармонік, що коливається в межах від 5,71% до 14%. Натомість регулятор з ШІМ забезпечує вихідну напругу в діапазоні від 221,3 до 277,1 В з коефіцієнтом гармонійних спотворень від 4,03% до 4,82%.

Ключові слова:

ФОТОЕЛЕКТРИЧНА УСТАНОВКА, ІНВЕРТОР, СОНЯЧНА БАТАРЕЯ, АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ, ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ.

ЗМІСТ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП | 6 |
| 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ..... | 8 |
| 1.1 Аналіз типів систем резервного живлення..... | 8 |
| 1.2 Аналіз основних сонячних фотоелектричних систем | 10 |
| 1.3 Варіанти встановлення фотомодулів | 13 |
| 1.4 Аналіз потенціалу сонячної енергетики Тернопільського регіону..... | 16 |
| 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ..... | 17 |
| 2.2 Вибір сонячної батареї для фотоелектричної установки..... | 20 |
| 2.3 Вибір акумуляторної батареї для фотоелектричної установки..... | 24 |
| 2.4 Вибір конструкції фотоелектричної установки | 26 |
| 2.5 Розрахунок ефективності фотоелектричної установки..... | 27 |
| 2.6 Розрахунок балансу енергії ФЕУ | 29 |
| 2.7 Розрахунок площі сонячних батарей | 31 |
| 2.8 Визначення ємності акумуляторної батареї..... | 32 |
| 3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ | 35 |
| 3.1 Дослідження стабільності вихідної напруги в інверторі з класичним алгоритмом регулювання..... | 35 |
| 3.2 Регулятор із широтно-імпульсною модуляцією | 39 |
| 3.3 Вплив додаткового несиметричного імпульсу навантаження на роботу інвертора. | 41 |
| 3.4 Розрахунок ймовірності безвідмовної роботи акумуляторної батареї... .. | 44 |
| 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ..... | 46 |
| 4.1 Заходи безпеки при роботі з електроустановками. | 46 |
| 4.2 Норми проектування енергетичних об'єктів | 50 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 52 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ..... | 53 |

ВСТУП

При експлуатації електричних мереж можуть виникнути деякі проблеми, такі як: тривале відключення живлення споживачів при аваріях, короточасні імпульси при включенні додаткових споживачів, зниження та підвищення напруги мережі за зміни величини підключеного до неї навантаження. Все перелічене вище може призвести до виходу з ладу побутового обладнання, відключення систем пожежогасіння. Для забезпечення якісної електроенергією приватних будинків необхідно застосовувати джерела резервного живлення.

Розвиток малих сонячних фотоелектричних установок (ФЕУ), що функціонують паралельно з електромережею, може значно покращити електропостачання для побутових споживачів. Цей підхід є більш ефективним та швидким у порівнянні з розбудовою великомасштабних енергосистем. Саме тому дослідження та вдосконалення обладнання малих сонячних ФЕУ є **актуальною** задачею з великим практичним значенням.

Система управління резервними джерелами живлення, це комплекс засобів і методів управління, які необхідні для забезпечення безперебійної роботи всього устаткування, у будинку які працюють з цією системою. Коли відбувається збій або екстрене відключення подачі електроенергії від стаціонарної електромережі, тоді система з резервним електропостачанням забезпечує потреби електроприладів до тих пір, поки не відбудеться відновлення основного джерела живлення. В автономних системах живлення можуть використовуватися різні види джерел живлення, які здатні забезпечити незалежне електропостачання від основної мережі. Основним призначенням сучасних джерел резервного живлення є здійснення постійного доступу до електроенергії навіть при проблемах з основним джерелом електроенергії. Найбільш сучасні та перспективні системи резервного живлення передбачають повний контроль та управління, як за джерелами альтернативної енергії, так і за самою системою за допомогою використання

бездротових методів, так що користувач може віддалено спостерігати за роботою всього комплексу забезпечення резервним живленням.

Метою даної роботи є створення проекту системи керування резервними джерелами живлення на основі джерел альтернативної енергії.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Аналіз типів систем резервного живлення

Основне завдання, яке покладають систему керування резервним джерелом живлення, це забезпечення безперебійної роботи всього обладнання, що знаходиться в будинку та підключені до цієї системи. Коли відбувається збій або екстрене відключення подачі електроенергії від стаціонарної електромережі, тоді система з резервним електропостачанням забезпечує потреби електроприладів до тих пір, поки не відбудеться відновлення основного джерела живлення. В автономних системах живлення можуть використовуватись різні види джерел живлення, які здатні забезпечити незалежне електропостачання від основної мережі. Основним призначенням сучасних джерел резервного живлення є здійснення постійного доступу до електрики навіть при проблемах з основним джерелом електроенергії.

Резервні джерела живлення виконують такі функції:

- контроль електромережі;
- фільтрацію стрибків напруги;
- заряджання акумуляторів.

Коли параметри електричної енергії не відповідають нормам або вона зовсім відсутня, автоматика підключає інвертор, та заживляє навантаження від акумуляторної батареї.

Інвертором служить для перетворення постійного струму в змінний. Основним джерелом постійного струму із заданою напругою 12 вольт є як акумуляторна (АКБ), так і сонячна батареї.[1]

Прикладом недорогого інвертора є інвертор, що перетворює постійну напругу з батареї зі значенням 12В змінну напругу величиною 220В. У даних типів інверторів вихідний сигнал недостатньо хороший для техніки, у якої є перетворювачі живлення, які від такої напруги сильно нагріваються, через що

скорочується термін їхньої служби. У хороших інверторів на виході є «чистий синус».

Для перетворення енергії в інверторі застосовуються акумуляторні батареї, що розряджаються з часом. Їх заряджають за допомогою зарядного пристрою, підключеного до генератора чи міської мережі. Найсучаснішим рішенням є заряд АКБ джерелами альтернативної енергії. Інвертор є джерелом резервного живлення від якого під час відсутності основної мережі живляться прилади домашньої побутової техніки, наприклад, холодильник, телевізор, систему освітлення.

Сучасне безперебійне резервне електропостачання приватного будинку можливе за допомогою сонячних батарей. Система батарей є екологічним способом отримання електричної енергії для живлення мережі. Елементи сонячної батареї складаються із фотоелектричних модулів, які покривають скло. Це скло має певну текстуру і дозволяє поглинати багато сонячного світла.

Вітрогенератор можна застосовувати як джерело отримання електроенергії тільки на території, де є вітер. Зараз це джерело енергії рідко використовується як резервне електропостачання заміського будинку через несприятливі для роботи умови.

Газогенераторні електростанції можуть працювати на природному та зрідженому газі. Вони підключаються до газової системи. Вартість роботи даних джерел живлення зазвичай значно нижча, ніж в інших генераторів. Газогенераторні електростанції мають:

- синхронний асинхронний акумулятор;
- вбудовану систему автоматичного керування;

Найчастіше електростанції призначені для тривалої безперебійної роботи в авторежимі з можливістю контролю дистанційно. Шкідливих викидів від даних приладів менше.

Автономною називається така система, за якої відсутня живлення від міської мережі, електроенергія береться від альтернативних джерел: сонячних

батареї, вітрогенераторів, гідрогенераторів. Режим роботи такої системи проводиться за циклом від живлення навантажень до заряду джерел енергії. На повторення даного циклу впливають ємність АКБ, а також потужність, що споживається навантаженнями.[2]

У багатьох випадках інверторна система може замінити генератор. Порівняно із системою резервного живлення «просто генератор» система «інвертор + акумулятори» має такі переваги:

інвертор перемикає миттєво. А генератор з автозапуском запускається 20 секунд або більше;

інвертор сам перемикає лінії живлення, а генератору потрібен щит АВР (автовода резерву);

інвертор безшумний, а генератор – ні;

інвертор та акумулятори можна поставити в будинку, вони нічого не виділяють у повітря;

генератору потрібно окреме приміщення чи навіс;

генератор вимагає бензин та масло;

термін служби генератора менше терміну служби інвертора та гелевих акумуляторів.

1.2 Аналіз основних сонячних фотоелектричних систем

Фотоелектричне перетворення сонячної енергії базується на прямому перетворенні сонячної енергії на електричну за допомогою напівпровідникових структур і в даний час є одним із пріоритетних напрямків використання сонячної енергії, що обумовлюється таким факторами:

- можливістю отримання електроенергії у будь-якому регіоні Землі;
- екологічною чистотою процесу перетворення енергії;
- тривалим терміном служби;
- невеликими витратами на обслуговування;

- відносно високою якістю електроенергії за локального електропостачання.

Фотоелектричні джерела енергії застосовуються для живлення споживачів у широкому інтервалі потужностей: від міні генераторів для годинника і калькуляторів потужністю в кілька Ват до електростанцій мегаВатної потужності.

Нині щорічне виробництво фотоелектричних установок у світі становить близько 10 ГВт, а темпи зростання виробництва фотоелементів перевищили 40%.

До складу фотоелектричної установки входять

- Фотоелектричний модуль (ФЕМ) або панель, що складається із сонячних елементів (solar cell) із кристалів кремнію, служить для генерації певної кількості електроенергії від сонячного випромінювання.
- Контролер заряду акумулятора служить для збору електроенергії виробленої ФЕМ і заряду АКБ від фотоелектричного модуля, і навіть управління цими процесами, тобто. перевіряє напругу та струм на клеммах АКБ.
- Акумулятор (АБ) служить для зберігання енергії, яку вироблена ФЕМ.
- Інвертор змінного струму: напруга 12, 24, 48 В з переведенням в електроенергію змінного струму напруги 220/380 В
- Комутуючі пристрої, дроти, запобіжники, автомати захисту

Автономні фотоелектричні системи (АФС)

Автономні фотоелектричні системи використовуються там, де немає мереж централізованого електропостачання (рисунк 1.1).

Акумуляторна батарея (АБ) служить для зберігання енергії, яка вироблена ФЕМ та стабілізація напруги на навантаженні. Комутують пристрої, дроти, запобіжники, автомати захисту.

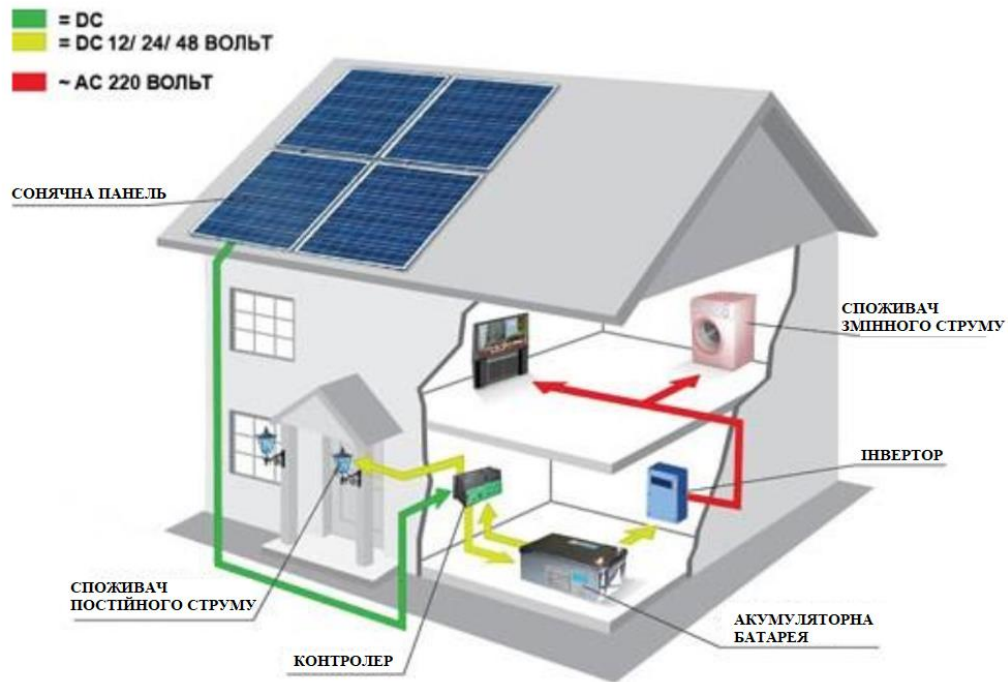


Рисунок 1.1 Схема автономної фотоелектричної системи

Розглянемо коротко режим роботи сонячної системи. Під дією сонячного випромінювання електрична енергія постійного струму, яка генерується у ФЕМ, через комутаційний пристрій надходить у контролері заряду, де перетворюється на електричну енергію постійного струму напругою 12, 24, 48 для заряду банок АКБ.

Далі енергія постійного струму надходить в інвертор, де перетворюється на енергію змінного струму напругою 220 В і цю енергію вже можна використовувати для навантаження в будинку.

Якщо навантаження в будинку споживається менше, ніж виробляють фотоелектричні модулі, надлишки енергії йдуть на акумулятори.[3]

Сполучені з мережею сонячні фотоелектричні системи

Установка такої станції дозволяє суттєво знизити споживання електроенергії з мережі або для вироблення електроенергії в мережу з подальшим продажем за Зеленим тарифом. (рисунок 1.2)

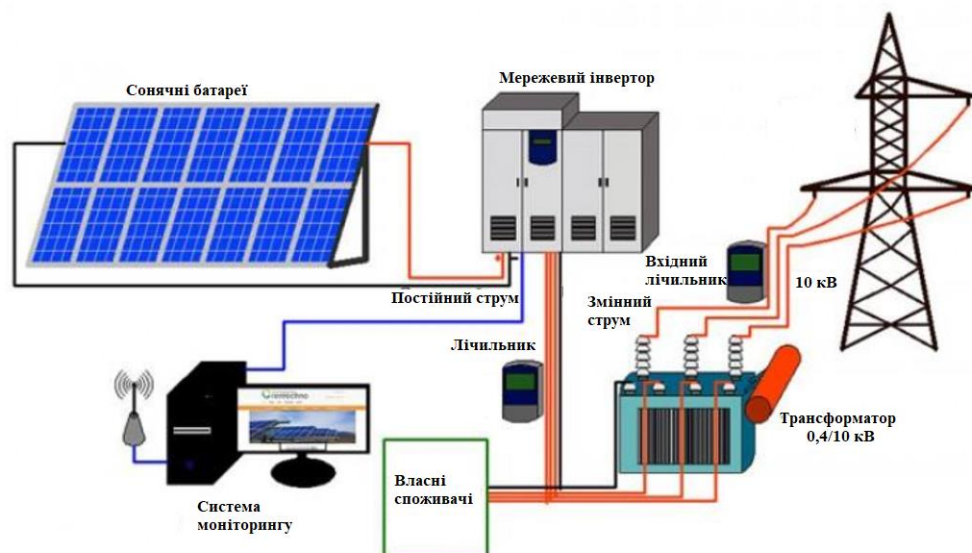


Рисунок 1.2 Структурна схема підключення СФС

Мережева станція не комплектується АКБ і не може використовуватися як єдине джерело енергії, вона працює спільно з мережею. Інвертор віддає у мережу всю енергію, вироблену фотомодулями.

Іноді мережні сонячні станції можуть комплектуватись додатковим обладнанням:

- акумуляторні батареї для живлення резервованого навантаження споживача у разі відключення зовнішньої електромережі;
- системи контролю неприпустимості перетоків електроенергії, що генерується сонячною електростанцією, у загальну мережу;

1.3 Варіанти встановлення фотомодулів

Розглянемо основні варіанти встановлення сонячних батарей ФЕУ[4]

Розміщення на скатному даху. Такий варіант розміщення є особливо актуальним для приватних будинків. Схил даху має заданий кут і розміщення фотоелектричних модулів на ньому дозволяє уникнути проблеми взаємного затінення батарей. Та й займана сонячними батареями площа в цьому випадку буде мінімальною. Для такої системи необхідна площа складатиметься із суми площ сонячних панелей і складе близько 75 кв.м., що обумовлено

необхідністю залишати проходи між батареями для їхньої подальшої експлуатації.

Розміщення на плоский дах. Даний варіант розміщення найбільш вигідний для великих промислових господарств, які мають будинки з досить великою площею даху. При встановленні ФЕС на плоскій покрівлі кут нахилу сонячних батарей найчастіше вибирається в діапазоні 10-15 градусів. Це необхідно для збільшення міцності конструкції та її опору погодним умовам. По-перше, при малому куті нахилу зменшується парусність сонячних батарей, що дозволяє спростити та здешевити кріплення. По-друге, при таких низьких значеннях кута нахилу взаємне затінення ФЕМ невелико, що дозволяє розташовувати ряди модулів ближче один до одного і позитивно позначається на кількості площі, що займається. Для встановлення обумовленої системи сонячних батарей на плоскому даху буде достатньо близько 125 кв.

Наземна сонячна електростанція Якщо ви маєте достатньою кількістю вільної території, то найбільш раціональним є розміщення сонячних батарей під кутами, близькими до оптимальних. Такий варіант розміщення модулів буде для вас найбільш привабливим з точки зору збільшення сумарного вироблення електроенергії та прискорення терміну окупності витрат, понесених на проектування сонячної електростанції, купівлю та монтаж обладнання. Наземне розташування сонячної електростанції під оптимальними кутами відмінно підійде як приватних, так промислових господарств.

Для наземного варіанта розміщення ФЕС слід розглянути, як буде зафіксовано кут нахилу фотоелектричних модулів.

Існує кілька варіантів встановлення сонячних батарей на наземних металоконструкціях:

1. Фіксований кут, підібраний для максимальної генерації енергії протягом року. Такий варіант є найпоширенішим у разі комерційних сонячних електростанцій.

2. Кут нахилу, що фіксується у найбільш ефективному для зимового сезону положенні. Такий варіант може бути затребуваний у разі систем резервного електроживлення за великої потреби електроенергії в зимовий час

3. Кут нахилу, що фіксується у найбільш ефективному для літнього сезону положенні. Цей варіант, що найбільше підходить для об'єктів, що використовуються тільки в літній період (дачі, будинки відпочинку, пансіонати).

4. Зміна кута нахилу 2 рази на рік - на кут, оптимальний для кута виробництва енергії взимку та кут, оптимальний для виробництва енергії в період весна-осінь. Такий варіант іноді застосовується у разі комерційних сонячних електростанцій, якщо є можливість витратити ресурси на періодичну зміну орієнтації сонячних панелей.

5. Одновісна трекерна система. У цьому випадку генерація електроенергії збільшується на 10% проти стаціонарними металоконструкціями.

6. Двоосна трекерна система. У цьому варіанті генерація електроенергії збільшується на 25-30% проти стаціонарними металоконструкціями.

Кожен із перелічених вище варіантів має свої плюси та мінуси. Наприклад, при використанні трекерних систем виробляється максимальна кількість енергії для заданого регіону, але така система займає більшу площу. З іншого боку, при використанні фіксованого кута нахилу витрачається менша кількість коштів на встановлення та обслуговування фотоелектричної системи, але і кількість енергії, що генерується, буде трохи нижче. Найчастіше використовується кут нахилу, що фіксується для найбільш ефективної цілорічної генерації, але в такому разі вироблення енергії взимку мінімальне і якщо ви встановлюєте ФЕС для автономного або резервного забезпечення об'єкта електроенергією, то в зимовий період, можливо, буде необхідно докуповувати енергію або шукати додаткові її джерела .

1.4 Аналіз потенціалу сонячної енергетики Тернопільського регіону

Тернопільська область займає площу 13.8 тис. км², що становить 2,3% території України. Крайня північна точка області, село Переморівка в Шумському районі, розташована на координатах 50°13' пн. ш. 26°12' сх. д. Крайня південна точка, село Білівці в Борщівському районі, має координати 48°31' пн. ш. 26°21' сх. д. Крайня західна точка, село Дуляби в Бережанському районі, знаходиться на координатах 49°32' пн. ш. 24°42' сх. д. Крайня східна точка, село Окопи в Борщівському районі, розташована на 48°32' пн. ш. 26°24' сх. д. Протяжність області з півночі на південь становить 195 км, а із заходу на схід — 129 км.[5,6]

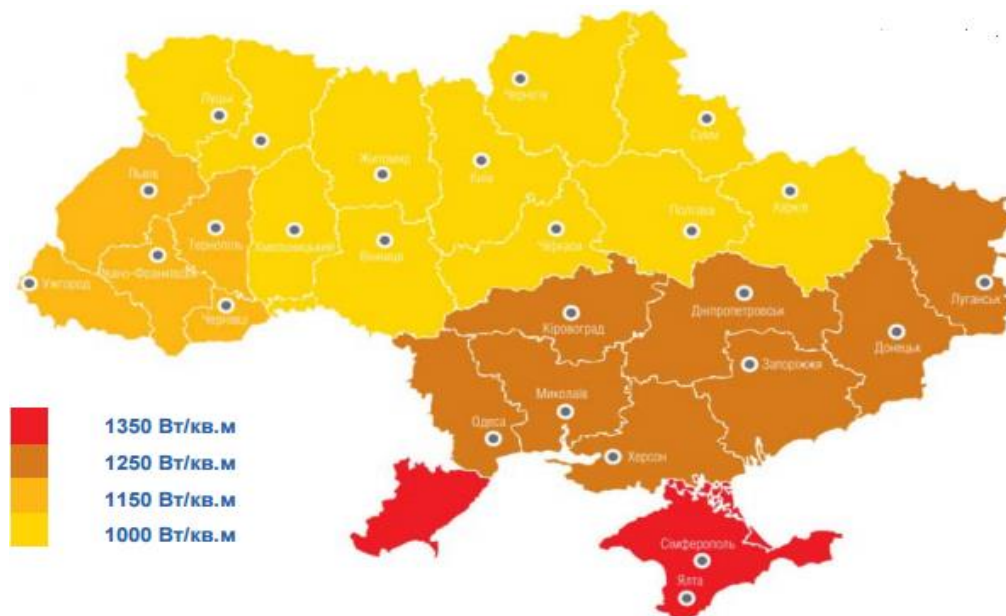


Рисунок 1.3 – Карта розподілу сонячної інсоляції на території України

Радіаційний баланс в області є додатній і коливається від 39 до 41,5 ккал/см² на рік. Найвищі значення спостерігаються влітку (у червні та липні), а найнижчі — взимку (у грудні та січні).

Клімат області значною мірою формується завдяки циркуляції океанічних і континентальних повітряних мас. Циклони, що надходять з Атлантичного океану, несуть із собою морське повітря. Зі свого боку, холодні арктичні повітряні маси, що проникають з півночі, спричиняють пізні весняні та ранні осінні заморозки.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Аналіз електроспоживання у будинку

Фотоелектрична установка для приватного житлового будинку розташовується біля міста Тернопіль. В будинку проживає 4 людини, які споживають біля $9 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{добу}$ електроенергії. Погодинний розподіл електроенергії зведено в таблиці 2.1 та 2.2

Таблиця 2.1 – Погодинний розподіл споживання електроенергії приватного будинку з 00:00 год до 12:00

| Споживач | Потужність , <i>Вт</i> | Кількість | Години споживання енергії <i>кВт · год</i> | | | | | | | | | | | |
|------------------|---------------------------|-----------|--------------------------------------------|------|------|------|------|-------|-----|------|------|-------|------|------|
| | | | W1 | W2 | W3 | W4 | W5 | W6 | W7 | W8 | W9 | W10 | W11 | W12 |
| Комп'ютер | 100 | 1 | | | | | | | | | 0,1 | 0,1 | 0,1 | |
| Холодильник | 200 | 1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Телевізор | 50 | 1 | | | | | | | | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| LED лампи | 40 | 2 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | | | | | | | |
| Лампи | 20 | 2 | | 0,02 | | 0,02 | | | | | | | | |
| Чайник | 1500 | 1 | | | | | | 0,125 | | | | 0,125 | | |
| Стиральна машина | 1500 | 1 | | | | | | | | | | | | 1,5 |
| Водяний насос | 370 | 1 | | | | | | | | 0,28 | | | | |
| | | W | 0,24 | 0,26 | 0,24 | 0,26 | 0,24 | 0,325 | 0,2 | 0,53 | 0,35 | 0,475 | 0,35 | 1,75 |

Таблиця 2.2 – Погодинний розподіл споживання електроенергії приватного будинку з 13:00 год до 24:00

| Споживач | Потужність , <i>Вт</i> | Кількість | Години споживання енергії <i>кВт · год</i> | | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------------|-----------|--------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | W13 | W14 | W15 | W16 | W17 | W18 | W19 | W20 | W21 | W22 | W23 | W24 |
| Комп'ютер | 100 | 1 | | 0,1 | 0,1 | 0,1 | | | | | 0,1 | 0,1 | | |
| Холодильник | 200 | 1 | | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Телевізор | 50 | 1 | | | | | | 0,05 | | | 0,05 | 0,05 | | |
| LED лампи | 40 | 2 | | | | | | | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |

Продовження таблиці 2.2

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------|---|-----|-------|-------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| Лампи | 20 | 2 | | | | | | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| Чайник | 1500 | 1 | | | 0,125 | | | | | | | | | |
| Стіральна машина | 1500 | 1 | | | | 1,5 | | | | | | | | |
| Водяний насос | 370 | 1 | | 0,185 | | | | | | | | | | |
| | | W | 0,2 | 0,485 | 0,425 | 1,8 | 0,2 | 0,29 | 0,32 | 0,42 | 0,47 | 0,37 | 0,32 | 0,32 |

Сумарне споживання енергії за день становить $10,84 \text{ кВт} \cdot \text{год}$

Графічне представлення погодинного споживання електроенергії показано на рисунках 2.1 і 2.2

W кВт·год

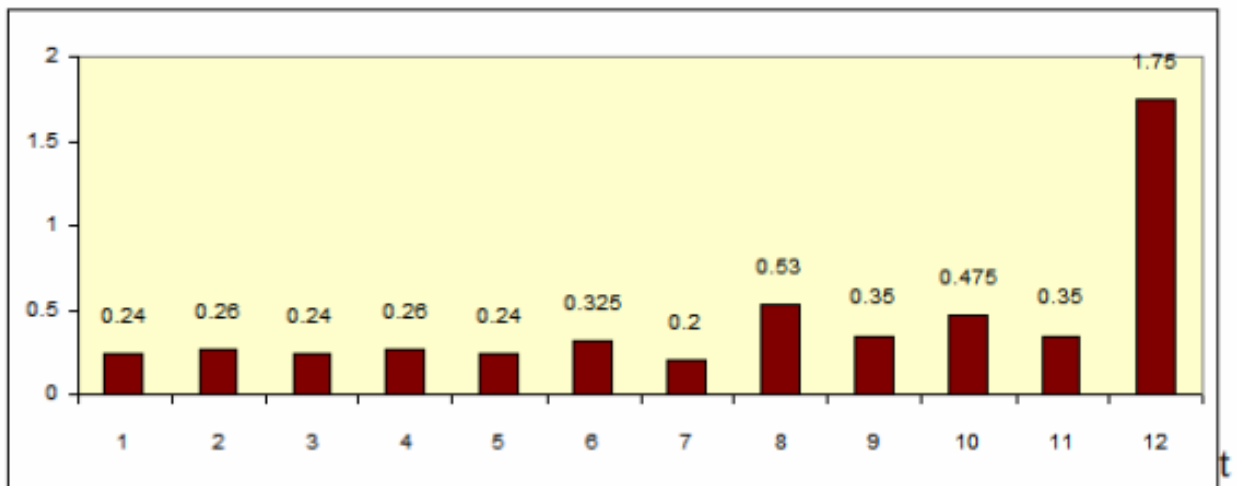


Рисунок 2.1 – Погодинний розподіл споживання електроенергії приватного будинку з 00:00 год до 12:00

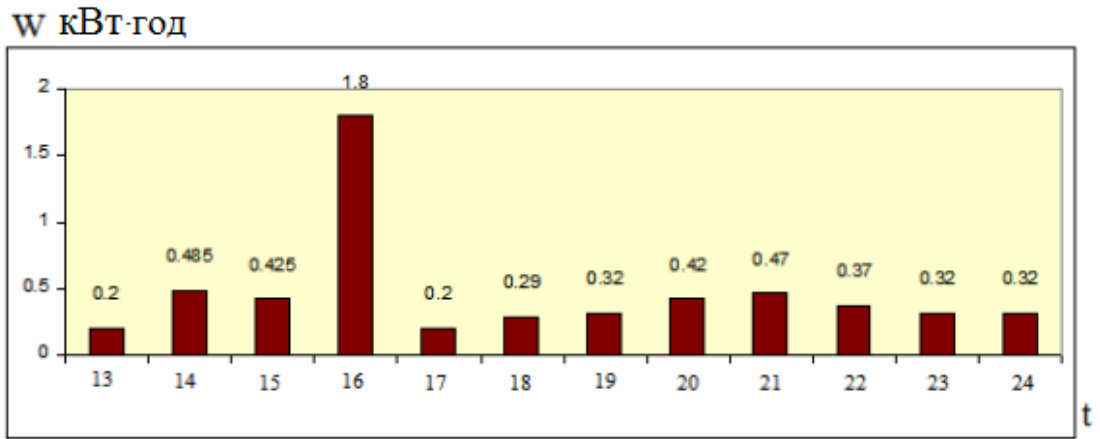


Рисунок 2.2 – Погодинний розподіл споживання електроенергії приватного будинку з 13:00 год до 24:00

В загальному в продовж ночі було спожито електроенергії (табл. 3.1 і 3.2)

$$\begin{aligned} \sum W_{ніч} &= W_{19} + W_{20} + W_{21} + W_{22} + W_{23} + W_{24} + W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + \\ &+ W_5 + W_6 = 0.32 + 0.42 + 0.47 + 0.37 + 0.32 + 0.32 + 0.24 + 0.26 + \\ &+ 0.24 + 0.26 + 0.24 + 0.325 = 3.8 \text{ кВт} \cdot \text{год} \end{aligned}$$

Відповідно впродовж світлового дня було спожито,

$$\begin{aligned} \sum W_{день} &= W_7 + W_8 + W_9 + W_{10} + W_{11} + W_{12} + W_{13} + W_{14} + W_{15} + W_{16} + \\ &+ W_{17} + W_{18} = 0.2 + 0.53 + 0.35 + 0.475 + 0.35 + 1.75 + 0.2 + 0.485 + \\ &+ 0.425 + 1.8 + 0.2 + 0.29 = 7.05 \text{ кВт} \cdot \text{год} \end{aligned}$$

Сумарне добове споживання електроенергії становить,

$$\sum W_{сум} = \sum W_{день} + \sum W_{ніч} = 7.05 + 3.8 = 10.85 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Середня нічна потужність (рис. 3.1) $P_{ср, ніч}$.

$$P_{ср, ніч} = \frac{\sum W_{ніч}}{T_{ніч}} = \frac{3.8}{12} = 0.3 \text{ кВт}$$

Середня спожита потужність впродовж дня

$$P_{ср, ніч} = \frac{\sum W_{день}}{T_{день}} = \frac{7.05}{12} = 0.6 \text{ кВт}$$

На рисунку 2.3 присутній пік споживаної потужності який досягає 1,8 кВт в результаті роботи пральної машини.

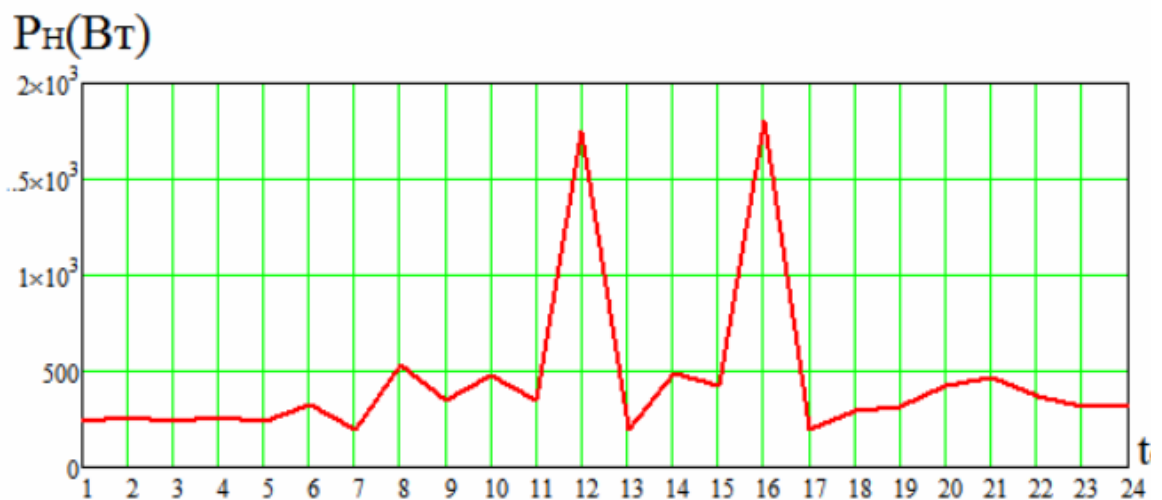


Рисунок 2.3 – Діаграма споживаної потужності впродовж дня

У Тернополі в приватних будинках енергоспоживання практично постійне протягом всього року. У вечірній і нічний час є максимум енергоспоживання від АБ.

2.2 Вибір сонячної батареї для фотоелектричної установки

Сонячні батареї поділяються на дві групи. До першої групи відносяться кристалічні фотоелектричні перетворювачі, до другої - тонкоплівкові сонячні батареї (СБ). Виробництво напівпровідникових структур на основі монокристалічного кремнію є технологічно складним та дороговартісним. Тому основна кількість фотоелектричних модулів виробляється на основі аморфного кремнію a-Si:H, арсеніду галію або полікристалічних напівпровідників.

Структура тонкоплівкових сонячні елементи (СЕ) формується з декількох тонких шарів напівпровідникових фотоелектричних матеріалів. Товщина таких шарів лежить в діапазоні від декількох нанометрів до декількох тисяч нанометрів. До найбільш поширених матеріалів. Що використовуються при виробництві тонкоплівкових сонячних елементів належать: кремнію (TF-Si), телуриду кадмію (CdTe);

На рисунку 2.4 показано вольт-амперні характеристики різних типів сонячних батарей в однаковому масштабі.

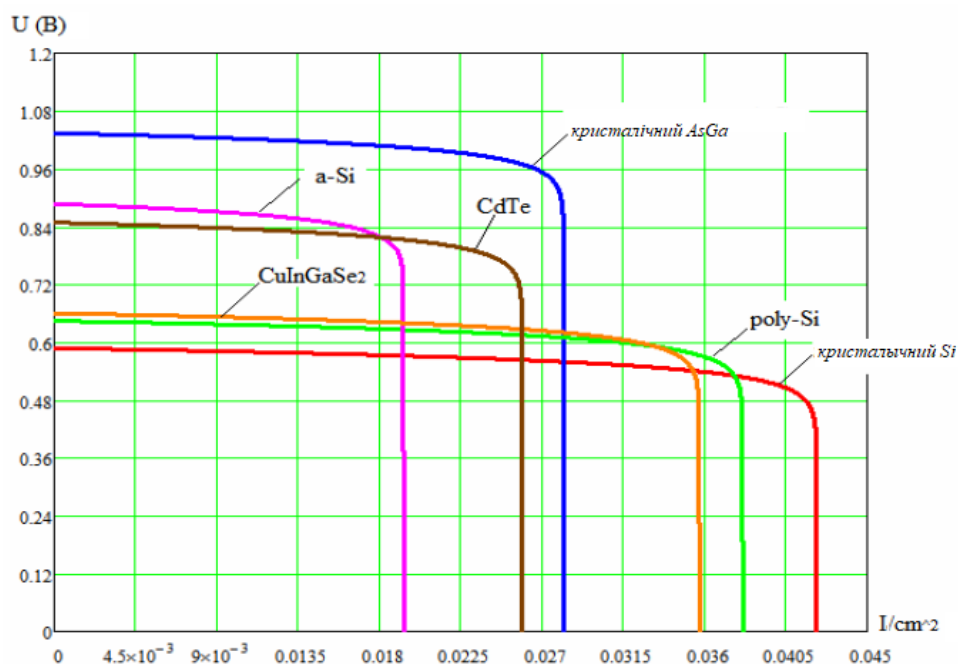


Рисунок 2.4 – Вольт-амперні характеристики сонячних батарей різних типів

Таблиця 2.3 Характеристики сонячних батарей різних типів

| Тип СБ | $I_{КЗ}$ (мА/см ²) | $U_{ХХ}$ (В) | $I_{опт}$ (мА/см ²) | $U_{опт}$ (В) | P_{max} (мВт/см ²) | ζ (КЗ) | η (%) |
|-----------|--------------------------------|--------------|---------------------------------|---------------|----------------------------------|--------------|------------|
| C-Si | 42,2 | 0,672 | 40,4 | 0,59 | 23,85 | 0,842 | 24 |
| AsGa | 28,2 | 1,034 | 27,422 | 0,942 | 25,826 | 0,886 | 26 |
| poly-Si | 38,1 | 0,644 | 36,409 | 0,564 | 20,54 | 0,837 | 20,5 |
| a-Si | 19,4 | 0,723 | 18,619 | 0,64 | 11,916 | 0,85 | 11,9 |
| CuInGaSe2 | 35,7 | 0,66 | 34,120 | 0,58 | 19,791 | 0,84 | 19 |
| CdTe | 25,9 | 0,726 | 24,882 | 0,643 | 15,995 | 0,851 | 16 |

У таблиці 2.3 прийняті наступні позначення:

$I_{КЗ}$ – питомий струм короткого замикання, $U_{ХХ}$ – напруга холостого ходу, $I_{опт}$ – питомий оптимальний струм, $U_{опт}$ – оптимальна напруга, P_{max} –

питома максимальна потужність, ζ – коефіцієнт заповнення, η – ККД у точці максимальної потужності.

З аналізу таблиці 2.3 бачимо, що для сонячних батарей на основі: C-Si та AsGa притаманний найбільший ККД. В порівнянні з C-Si, AsGa є дорожчим оскільки, тому для побудови ФЕУ вибираємо кристалічні сонячні батареї на основі C-Si. Коефіцієнт ζ є основним параметром для оцінювання ефективності сонячної батареї. Він визначається максимальної потужності до добутку напруги холостого ходу U_{xx} на струм короткого замикання. Для комерційних сонячних панелей коефіцієнт заповнення є більшим 0.7. В свою чергу сонячні панелі більш дешевого класу мають коефіцієнт заповнення від 0.4 до 0.7. Для комерційних сонячних панелей з високим коефіцієнтом заповнення втрати на послідовні та паралельні опори є меншими в порівнянні з СБ дешевого класу. Залежність вихідного струму та потужності сонячного елемента від напруги показано на рисунку 2.5

На рисунку 2.5 зображено характеристику потужності сонячного елемента $P_{CE} = U_{CE} I_{CE}$ яка генерується при зміні вихідної напруги від U_{xx} до нуля. Дана характеристика показує, що існує максимум кривої (точка С), в якому спостерігається найбільше значення P_{max} . При проектуванні ФЕУ необхідно забезпечити роботу сонячної батареї таким чином, щоб напруга $U_{опт}$ та струм $I_{опт}$ завжди мали значення при якому потужність СБ відповідала точці з оптимальною робочою точкою ВАХ.

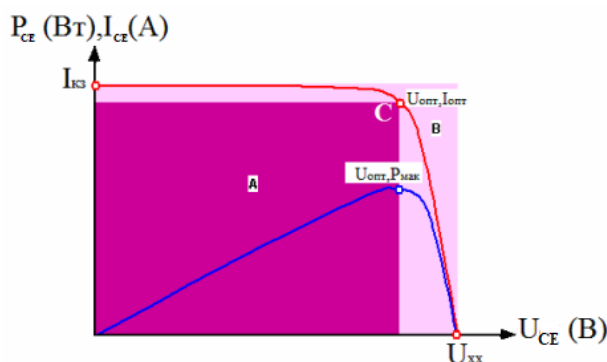


Рисунок 2.5 Вольт-амперна характеристика та потужність СЕ

$$\zeta = \frac{I_{OPT} \cdot U_{OPT}}{I_{KЗ} \cdot U_{ХХ}}$$

Для сонячних батарей на основі AsGa значення коефіцієнта заповнення ζ лежить в межах від 0,75 до 0,89.

Для обраної сонячної батареї дана величина становить від 0,8 до 0,84, що буде враховано при подальших розрахунках. ККД визначається відношенням потужності, виробленої СЕ, до потужності сонячного випромінювання, що впало на поверхню СБ. Також на ККД СЕ впливає спектр падаючого сонячного випромінювання, його інтенсивності та температури СЕ. Порівняння двох сонячних елементів провадиться при прийнятих стандартних умовах. Випробування СБ провадиться при повітряній масі AM1.5 за температури 25°C, тобто. у середніх широтах при висоті Сонця 41” 49'. Визначення енергетичних характеристик сонячної батареї провадиться при номінальних умовах освітлення ($P_C=1000W \text{ м}^2$). За рахунок відбиття сонячного випромінювання від конструкційних елементів СБ (скла, затінення, рами) ефективність панелі, є нижчою на 1÷3% нижча, в порівнянні з ефективністю фотоелемента.

Враховуючи вище сказане для проекту резервного джерела живлення будинку було вибрано СБ марки PSM4 150W, загальний вигляд яких та параметри показано на рисунку 2.6



| | |
|---------------------------------|------|
| Максимальна потужність, Вт | 150 |
| Напруга при макс. потужності, В | 34 |
| Струм при макс. потужності, А | 4,2 |
| Напруга х.х., В | 43,2 |
| Струм к.з, А | 4,4 |
| Напруга у системі, В | 600 |
| НОСТ, °С | 45 |

Рисунок 2.6 – Загальний вигляд та параметри СБ марки PSM4 150W

2.3 Вибір акумуляторної батареї для фотоелектричної установки

Для вибору акумуляторної батареї (АБ) АБ. Скористаємося матричним характеристиками акумуляторів, сформованого на основі статистичного дани, для різних типів АБ [12].

Таблиця 2.4 Характеристики акумуляторів

| Характеристики | Тип акумуляторної батареї | | | | | |
|--------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | NsCd | NiMn | Свинцево-кислотні | Li-Ion | Li-Ion полімерн | Гелеві |
| Енергетична густина, Вт/кг | 45...80 | 60..120 | 150 | 110...160 | 100...130 | 180 |
| Внутрішній опір, мОм | 100..20 (батарея на 6 В) | 200...300 (батарея на 6 В) | менше 100 (батарея на 12 В) | 150...250 (батарея на 7,2 В) | 200...300 (батарея на 7,2 В) | менше 100 (батарея на 12 В) |
| Число циклів заряд/розряд до зниження ємності на 80% | 1500 | 300...500 | 200...300 | 500...1000 | 300...500 | 700 |
| Час швидкого заряду. год | 1 | 2...4 | 8...16 | 2...4 | 2...4 | 3,5 |
| Допустимий перезаряд | середній | низький | високий | дуже низький | середній | низький |
| Саморозряд за місяць при температурі 20 °С, % | 20 | 30 | 5 | 10 | 10 | 3 |
| Напруга на елементі. В | 1,25 | 1,25 | 2 | 3,6 | 3,6 | 2 |
| Струм відносно ємності (С) піковий-найбільш прийнятний | 20С до 1С | 5С до 0,5С | 5С до 0,2С | 2С до 1С | 2С до 1С | 5С до 0,2С |
| Діапазон робочих температур, °С | -40...60 | -20...60 | -20...60 | -20...60 | 0...60 | -20...60 |
| Обслуговування через | 30...60 дні. | 60...90 дні | 3...6 міс. | не регл. | не регл. | не регл. |

З розглянутих типів акумуляторних батареї для роботи з фотоелектричними установками найчастіше використовують гелеві та

свинцево-кислотні. В порівнянні з свинцево-кислотними гелеві акумулятори характеризуються унікальними параметрами. Гелієві АБ мають велику кількість циклів заряду-розряду, низький саморозряд та не потребують регулятора заряду струму. Такі акумулятори можуть тривалий час перебувати в розрядженому стані, Оскільки в них немає рідини їх експлуатація можлива в будь-якому положенні.

Гелеві акумулятори використовуються як елементи батарей для електротранспорту в системах безперебійного живлення, зеленої енергетиці. Останнім часом спостерігається розвиток технологій полімерних акумуляторних батарей, що в перспективі може витіснити гелеві акумулятори малої і середньої ємності. Але на ємностях (від 100Ач) гелеві АБ ще довго домінуватимуть в порівнянні з іншими типами акумуляторів. Для гелевих акумуляторних батарей важливим є забезпечення захисту від перезарядження. Системи заряду повинні мати обмежувач напруги при заряді, для забезпечення максимального терміну служби батареї, що становить понад 700 циклів заряду-розряду.

До переваг гелевих АБ відносяться:

- Не потребують обслуговування та захищенні від проливання корозостійкі
- при глибокому розряді мають високі показники
- можуть встановлюватися на негоризонтальну поверхню (при встановленні на бік втрата потужності не перевищує 10%)
- відсутнє газовиділення
- можуть використовуватися з електро- та магніточутливим електрообладнанням
- більш тривалий термін зберігання в порівнянні з іншими
- швидше перезаряджаються
- відсутнє обмеження сили струму при підзарядці до 13,8 В
- вібростійкість
- можуть працювати при підвищеній вологості

температура замерзання зарядженого акумулятора нижче -30°C

оптимальна питома вартість

найнижча питома вартість

Для реалізації проекту було вибрано акумуляторні батареї GX 12-200.

Загальний вигляд якої та технічні характеристики показано на рисунку 2.7.



| | |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Номінальна напруга, В | 12 |
| Число елементів, шт | 6 |
| Термін служби, рік | 10 |
| Внутрішній опір повністю зарядженої батареї (при 20°C), мОм | 3,6 |
| Саморозряд | 3 % ємності в місяць |
| Номінальна ємність, А·год | 205 |

Рисунок 2.7 Загальний вигляд якої та технічні характеристики батареї GX 12-200

2.4 Вибір конструкції фотоелектричної установки

Оскільки система керування сонячними батареями для орієнтації за Сонцем є громіздкою та вимагає встановлення складної системи з автоматизованими електроприводами, то для реалізації система керування резервним джерелом живлення приватного будинку було вибрано стаціонарну систему. Для даного розташування будинку оптимальний кут нахилу становить 40° . Так як споживачам потрібна стандартна напруга в системі буде використовувати інвертор для перетворення постійної напруги з АБ в змінну напругу 220 В частотою 50 Гц. Батареї будуть заряджатися в день, а темну пору доби живитимуть побутові прилади та інвертор.

Напруга панелі СБ і АБ вибирається враховуючи наступні міркування:

1. Забезпечення безпеки сонячних батарей та акумуляторів.
2. Забезпечити надійності роботи АБ і СБ. У високовольтних схемах надійність знижується.

3. Акумуляторні батареї мають великий розкид напруги між елементами тому вимагають для запобігання відмови порібно використати систему балансування.

Після проведення дослідження різних схем перетворювачів з синусоїдальним вихідним напругою буде уточнено напругу акумуляторів та сонячних батарей.

2.5 Розрахунок ефективності фотоелектричної установки.

Структурна схема фотоелектричної установки з джерелом струму PV1, що імітує сонячну батарею, акумуляторною батареєю (АБ) і інвертором з підвищувальним трансформатором TV показано на рисунку. 2.8

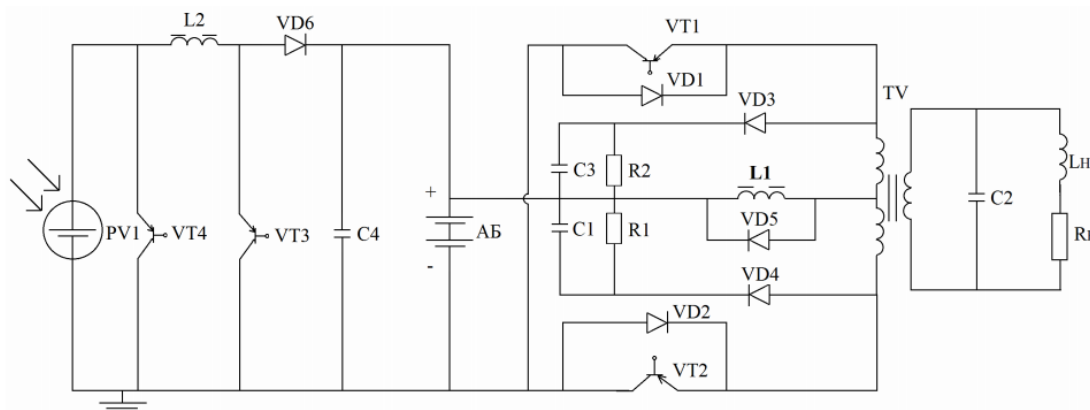


Рисунок 2.8 – Структурна схема фотоелектричної установки

Заряджання акумуляторної батареї відбувається, при напрузі сонячної батареї (яка зростає зі збільшенням освітлення) до рівня мінімальної напруги АБ, що складає 10 - 12 В. З'ясуємо, чи потрібен підвищувальний перетворювач напруги L2, VT3, VD6 між СБ і АБ.

На рисунку 2.9 показано можливі варіанти узгодження енергетичних характеристик фотоелектричної установки враховуючи умови освітленості в Україні.

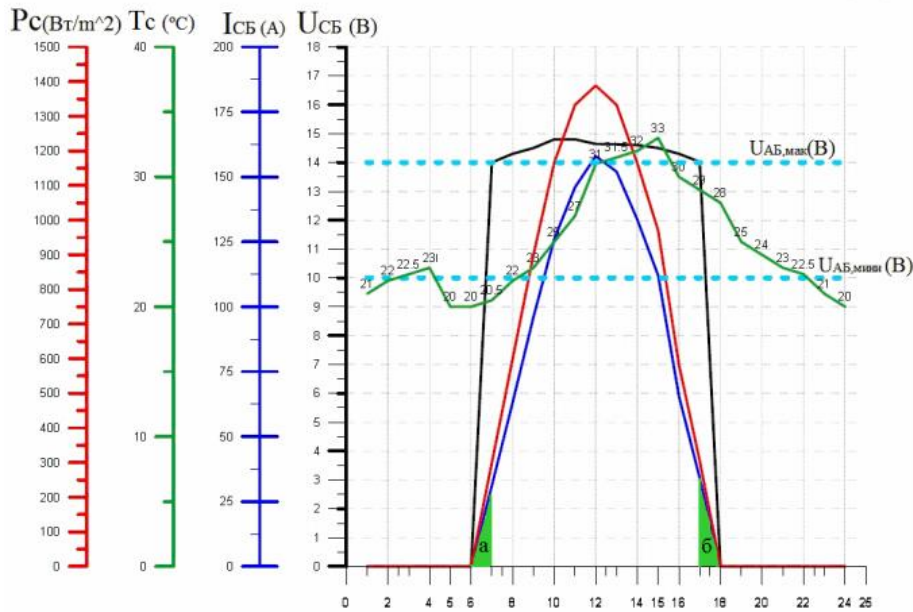


Рисунок 2.9 – Залежність характеристик СБ при зміні умов навколишнього середовища

На рисунку показано характеристики струму СБ $I_{СБ}$ (А), напруги СБ $U_{СБ}$ (В), для різних температур навколишнього середовища T , потужності сонячної інсоляції для різного часу доби P_c ($Вт / м^2$).

Як видно з графіка, недобір електричної енергії від сонячної батареї відбувається в період з 6 до 7 годин ранку та з 17 до 18 годин вечором, коли $U_{СБ} < U_{АБ}$. Тоді втрати електроенергії будуть пропорційні площі трикутників а та б.

Визначимо максимальний заряд, що теоретично віддається СБ впродовж періоду освітлення t_c :

$$Q_{\text{макс.СБ}} = I_{\text{ср.СБ}} t_c = 70 \cdot 12 = 840 \text{ А} \cdot \text{год}.$$

Розрахуємо втрати заряду ΔQ коли $U_{СБ} < U_{АБ}$. Впродовж доби це відбувається два рази по одній годині

$$\Delta Q_{\text{ранок}} = \frac{I_{\text{макс.}\Delta} t_{\Delta}}{2} = \frac{50 \text{ А} \cdot 1 \text{ год}}{2} = 25 \text{ А} \cdot \text{год} = \Delta Q_{\text{вечір}},$$

де $I_{\text{макс.}\Delta}$ - максимальний струм СБ через 1 годину після початку освітлення; t_{Δ} - час, коли $U_{СБ} < U_{АБ}$.

Сумарні втрата заряду, через $U_{СБ} < U_{АБ}$:

$$\Sigma_{\Delta}Q = \Delta Q_{ранок} + \Delta Q_{вечір} = 25 + 25 = 50 A \cdot год.$$

Відносне значення втрати заряду без перетворювача

$$\xi = \frac{\Sigma_{\Delta}Q}{Q_{макс.СБ}} = \frac{50}{2475} = 0,02 = 2\%.$$

ξ – величина, рівна частці втрати ємності сонячної батареї.

Розрахунок показав, що величина втрати заряду становить 2% тому не потрібно підвищувати напругу.

Коефіцієнт корисної дії підвищувального перетворювача реалізованого за схемою на рисунку 2.8 має ККД= 0,8. З 6 до 7 години та з 17 до 18 перетворювач використовує енергію для зарядки акумуляторних батарей. Хоча втрати в підвищуючому перетворювачі співставні з енергією, яка визначається площею трикутників а та б (рис.2.9), тому для покращення параметрів перетворювача СБ та АБ з'єднуються паралельно через діод VD6, що дає можливість відмовившись від L2 і VT3.

2.6 Розрахунок балансу енергії ФЕУ

Інформація рол добове споживання електроенергії (табл. 2.1 і 2.2.) дозволяє розрахувати баланс енергії. Сонячна батарея починає заряджати акумулятор, коли величина освітленості зроста. А напруга холостого ходу перевищує мінімальну напругу акумуляторної батареї. В процесі заряджання робоча точка (рисунок 2.10) зміщується з точки 2 в точку 1.

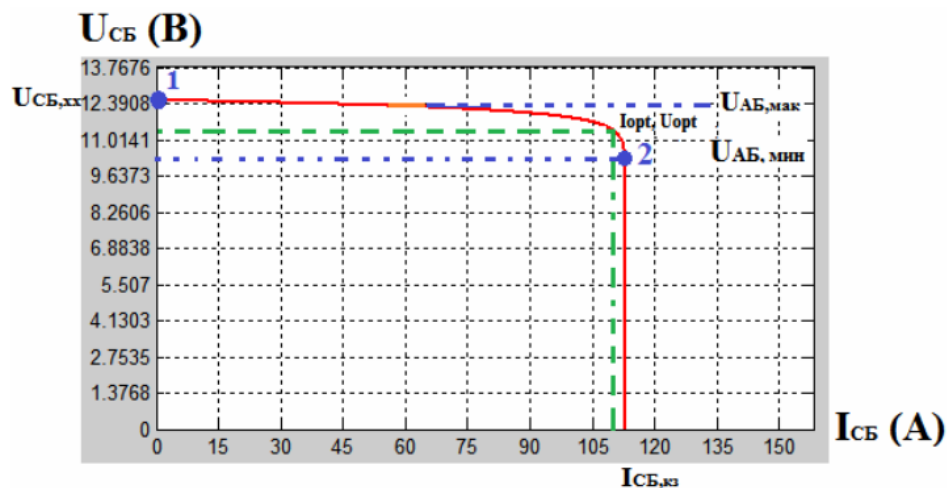


Рисунок 2.10 – Узгодження характеристик СБ і АБ

Як видно з графіка зарядний струм акумуляторної батареї зменшується до оптимального і далі до нуля (точка 1), $U_{\text{хх,СБ}} = U_{\text{макс,АБ}}$. В даному проекті ФЕУ працює в режимі обмеження напруги. Коли розрядна напруга, $U_{\text{АБ}}$ становить 12 В величина середнього розрядного струму АБ $I_{\text{ср, раз, ніч}}$ (А) дорівнює:

$$I_{\text{ср.розр.ніч}} = \frac{P_{\text{ср.ніч}}}{U_{\text{АБ}}} = \frac{0.3 \cdot 1000}{12} = 25 \text{ А}$$

В світлу пору доби середній розрядний струм на навантаженні $I_{\text{ср, раз, день}}$, становить (рис. 2.11);

$$I_{\text{ср.розр.день}} = \frac{P_{\text{ср.день}}}{U_{\text{АБ}}} = \frac{0.6 \cdot 1000}{12} = 50 \text{ А}$$

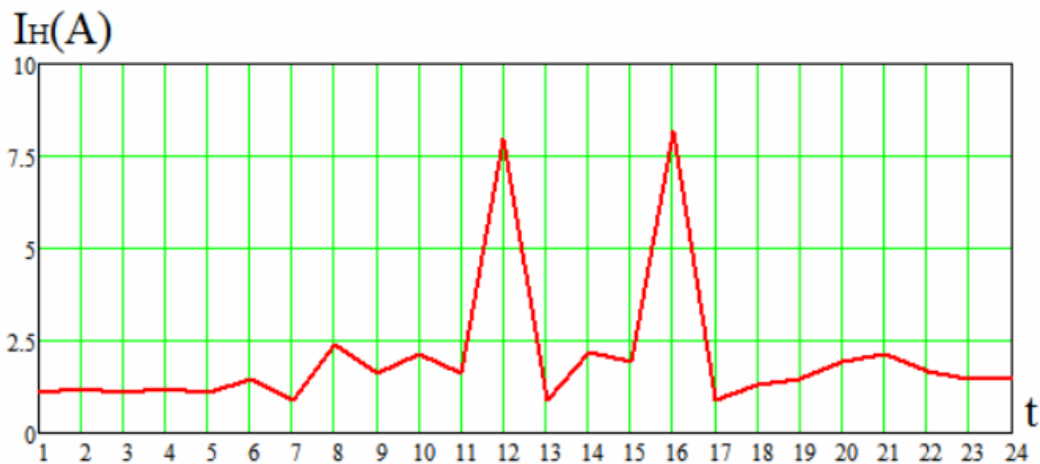


Рисунок 2.11 – Діаграма струму навантаження

ККД для свинцевих АБ $\eta_{\text{розряд}} = 0,85$. Розрядна ємність акумуляторної батареї для нічної експозиції $Q_{\text{АБ, раз, ніч}}$ (А·год) враховуючи ККД розряду і $T_{\text{ніч}} = T_{\text{день}} = 12$ годин:

$$Q_{\text{АБ.розр.ніч}} = \frac{I_{\text{ср.розр.ніч}} \cdot T_{\text{ніч}}}{\eta_{\text{розр}}} = \frac{25 \cdot 12}{0.85} = 352.94 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Впродовж дня розрядна ємність $Q_{\text{АБ, раз, день}}$, акумуляторної батареї буде

$$Q_{AB.розр.день} = I_{ср.розр.день} \cdot T_{день} = 50 \cdot 12 = 600 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Середнє значення струму $I_{ср.СБ}$ СБ,

$$I_{ср.СБ} = \frac{Q_{AB.розр.ніч} + Q_{AB.розр.день}}{T_{день}} = \frac{353 \cdot 600}{12} = 79 \text{ А}$$

Для нерухомих сонячних батарей, максимальна величина струму, що віддається сонячним батареям визначає їх габарити. Середнє значення струму, міняється згідно синусоїдального закону:

$$I_{ср.СБ} = \frac{2}{\pi} I_{макс.СБ} = 0.64 I_{макс.СБ} \text{ А}$$

Якщо не враховувати втрати енергії коли $U_{СБ} < U_{AB}$ даний вираз дозволяє визначити максимальний струм СБ::

$$I_{макс.СБ} = \frac{I_{ср.СБ}}{0.64} = \frac{79}{0.64} = 123 \text{ А}$$

2.7 Розрахунок площі сонячних батарей

Максимальна питома потужність $P_{СБ}$, яка виробляється СБ. становитиме

$$P_{СБ} = P_c \cdot \eta = 1000 \cdot 0.24 = 240 \text{ Вт/м}^2$$

Середня питома потужність СБ $P_{СБС}$ буде рівна:

$$P_{СБС} = P_{СБ} \frac{t_{день}}{t_{день} + t_{ніч}} = 240 \frac{12}{12 + 12} = 120 \text{ Вт/м}^2$$

Середня потужність навантаження $P_{НС}$ (Вт) за 24 години:

$$P_{НС} = P_{ср.день} + P_{ср.ніч} = 0.3 + 0.6 = 0.9 \text{ кВт}$$

Площу сонячної батареї $S_{СБ}$ можна визначити з величини середньої потужності навантаження та середньої питомої потужності:

$$S_{СБ} = \frac{P_{НС}}{P_{СБС}} = \frac{900}{120} = 7.5 \text{ м}^2$$

2.8 Визначення ємності акумуляторної батареї

Для побудови графіка ємності $Q_{ц}$, спочатку підраховуємо і розрядну ємність: $+ Q_{AB}$ - заряд АБ, а $- Q_{AB}$ - розряд (табл. 2.5). Розрахунки проводимо для кожної години для приросту зарядної та розрядної ємності акумуляторної батареї, згідно рівняння

$$Q_{AB} = Q_{CB} - Q_H$$

Таблиця 2.5– Розрахунок зарядної і розрядної ємності АБ.

| Час (год) | Заряд що віддає СБ, Q_{CB} ($A \cdot год$) | Заряд що приймається навантаженням, Q_H ($A \cdot год$) (При АБ = 12 В) | Зарядні і розрядні ємності АБ (Приріст) | Ємність АБ, Q_{AB} ($A \cdot год$) (Фактична) |
|-----------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1 | 0 | 20 | -20 | 201 |
| 2 | 0 | 21,7 | -21,7 | 179 |
| 3 | 0 | 20 | -20 | 159 |
| 4 | 0 | 21,7 | -21,7 | 137 |
| 5 | 0 | 20 | -20 | 117 |
| 6 | 0 | 27,1 | -27,1 | 90 |
| 7 | 40,8 | 16,7 | 24,1 | 24 |
| 8 | 61,7 | 44,2 | 17,5 | 42 |
| 9 | 83 | 29,2 | 53,8 | 96 |
| 10 | 105 | 39,6 | 65,4 | 161 |
| 11 | 127 | 29,2 | 97,8 | 259 |
| 12 | 142 | 146 | -4 | 255 |
| 13 | 131 | 16,7 | 114,3 | 369 |
| 14 | 109 | 40,4 | 68,6 | 438 |
| 15 | 88 | 35,4 | 52,6 | 490 |
| 16 | 64,6 | 150 | -85,4 | 405 |
| 17 | 42 | 16,7 | 25,3 | 430 |
| 18 | 0 | 24,2 | -24,2 | 406 |
| 19 | 0 | 26,7 | -26,7 | 379 |
| 20 | 0 | 35 | -35 | 344 |
| 21 | 0 | 39,2 | -39,2 | 305 |
| 22 | 0 | 30,8 | -30,8 | 274 |
| 23 | 0 | 26,7 | -26,7 | 248 |
| 24 | 0 | 26,7 | -26,7 | 221 |

Розрахунки ємності проводимо при мінімальній ємності АБ, що становить $24 \text{ А}\cdot\text{год}$ та максимальної ємності - $490 \text{ А}\cdot\text{год}$.

Тоді циклована ємність $Q_{\text{ц}}$ становитиме

$$Q_{\text{ц}} = \Delta Q_{\text{АБ}} = Q_{\text{макс}} - Q_{\text{мін}} = 490 - 24 = 470 \text{ А}\cdot\text{год}$$

Для АГМ батарей цикл заряду-розряду не повинен перевищувати 30% від номінальної ємності. Для гелевих акумуляторів дана величина може досягати 80%. Для збільшення терміну служби АБ вибираємо цикл заряду-розряду $Q_{\text{ц}} = 0,5 \cdot Q_{\text{н}}$.

Тоді номінальна ємність АБ становитиме:

$$Q_{\text{н}} = 2 \cdot Q_{\text{ц}} = 2 \cdot 470 = 940 \approx 1000 \text{ А}\cdot\text{год}$$

Оскільки така ємність забезпечує 50% циклів заряд-розряд. Розрахована номінальна ємність АБ дозволяє збільшити його термін служби. (рис. 2.12), Але згідно технічних параметрів батареї даного типу дозволяють до 80% циклу заряд-розряд від їх номінальної ємності

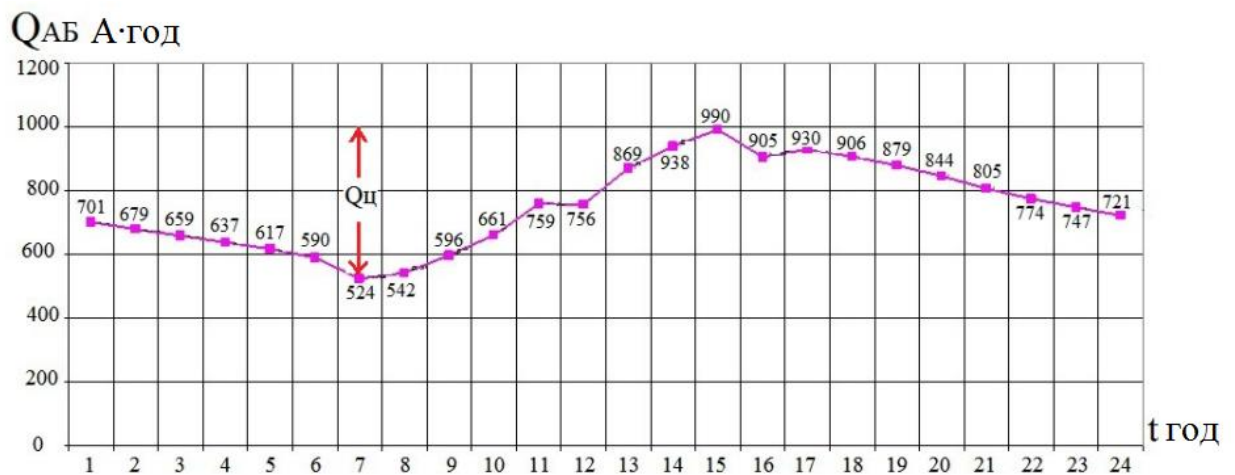


Рисунок 2.12– Графік залежності ємності АБ

Виходячи з технічних параметрів акумуляторної батареї з номінальною ємністю $200 \text{ А}\cdot\text{год}$ кількість паралельних з'єднань акумуляторних батарей $n_{\text{АБ}}$ становитиме :

$$n_{AB} = \frac{Q_n}{200} = \frac{1000}{200} = 5$$

Оскільки номінальна напруга акумулятора $U_{AB} = 12\text{В}$ – паралельних з'єднань акумуляторних батарей не здійснюється.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Дослідження стабільності вихідної напруги в інверторі з класичним алгоритмом регулювання

На даному етапі потрібно провести наступні додаткові дослідження схеми однофазного інвертора.[7,8]

1. Стабілізувати вихідну напругу інвертора до значення $K_u = 1,1$
2. Дослідити алгоритм автоматичного регулювання, який би забезпечив мінімальне значення коефіцієнта гармонік вихідної напруги при найменших значеннях ємності фільтру.
3. Визначити співвідношення параметрів вимірювального блоку між задаючим генератором пилоподібної напруги та постійною опорною напругою .

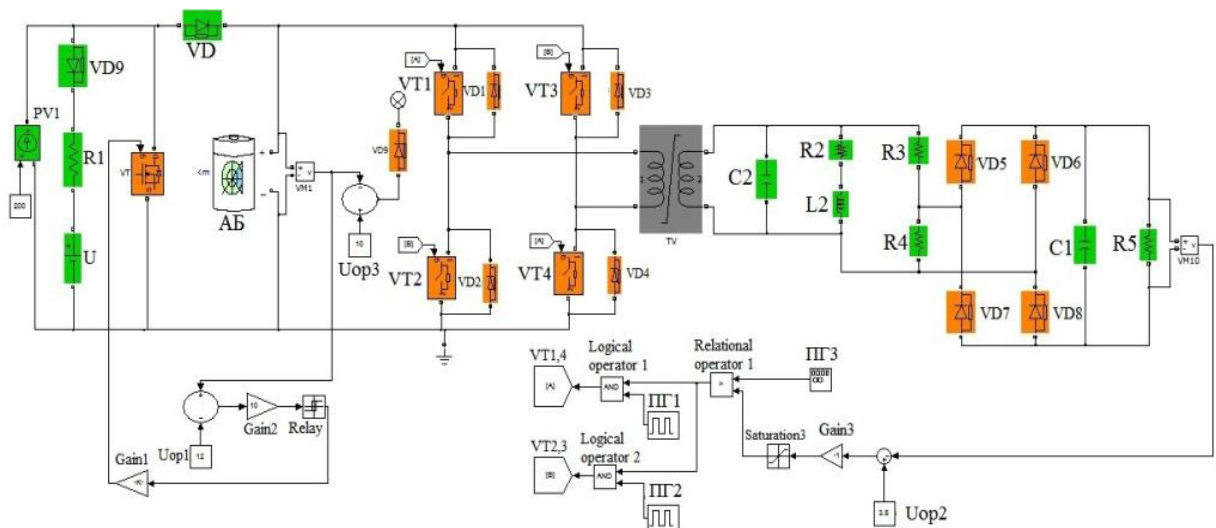


Рисунок. 3.1. Схема ФЕУ для моделювання у програмі Simulink

Параметри вимірювальних елементів та навантаження зведено в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 Параметри навантаження

| C_2 , мкФ | R_2 , Ом | L_2 , мГн | R_3 , кОм | R_4 , кОм | C_1 , мкФ | R_5 , кОм |
|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 150 | 19,36 | 46 | 26 | 0,45 | 100 | 10 |

Моделювалася ФЕУ з використанням класичним алгоритмом регулювання вихідної напруги (рис. 3.2). Амплітуда розгортаючої напруги симетричної

трикутної форми $U_p = 2$ В, з частотою $f_p=100$ Гц і опорною напругою $U_{OP2} = 3,5$ В.

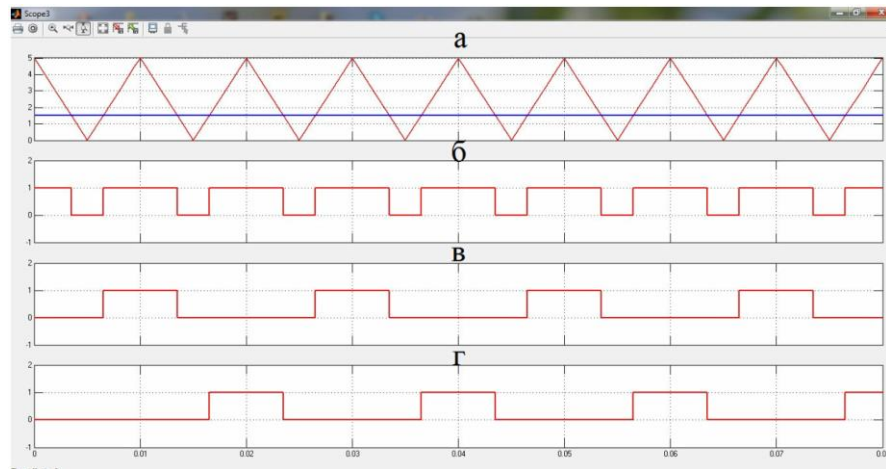


Рисунок 3.2. Алгоритм керування ключами, напруги U_H , а) порівняння опорної напруги з пилоподібним, б) сигнали після порівняння U_{op} і U_p , в) сигнали, що надходять VT 1,4, г) сигнали, що надходять VT 2,3

Для забезпечення стабільності U_H в режимі класичного алгоритму регулювання важливо визначити значення опорної напруги та амплітуду напруги розгортання. У таблиці 3.2 наведено результати а на рисунку 3.3 наведено характеристики, з яких видно, що параметре K_r збільшується. Якщо співвідношення параметрів між генератором та опорною напругою U_{op} , вибрати таким що задає U_p з прийнятним K_Γ та стабільною U_H , то видно (табл. 3.2), що $U_H = 235$ а $K_r = 10\%$. Отже для такої схеми можна прийняти $U_{op} = 3,5$ і $U_p = 2$.

Таблиця 3.2 Результати моделювання

| | | | | |
|----------------|------|------|-----|-----|
| U_{AB} | 14 | | | |
| $U_{op} + U_p$ | 5 | | | |
| U_{op} | 1,5 | 2,5 | 3,5 | 4,5 |
| U_p | 200 | 214 | 235 | 266 |
| K_Γ | 14,7 | 12,8 | 10 | 7,4 |

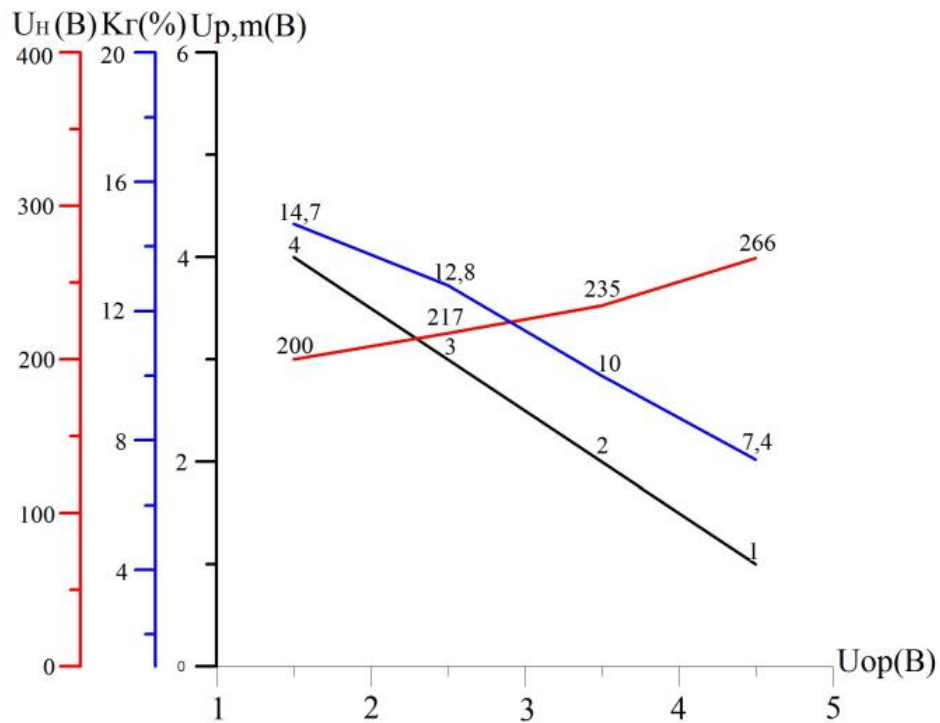


Рисунок 3.3. Характеристики інвертора залежно від опорної напруги U_{op} та максимальної амплітуди розгортаючої напруги $U_{r,m}$.

З вище наведених результатів можна бачити що класичний алгоритм керування вихідною напругою не забезпечує необхідне значення відхилення вихідної напруги від номінальної ($K_u = 1,1$) при коефіцієнті гармонік $K_r \leq 10\%$. Оскільки більшість комерційних інверторів характеризуються низьким коефіцієнтом гармонік, (для побутових споживачів він не повинен перевищувати 10%), потрібно провести додаткові дослідження, щоб простим регулюванням добитися найменшого коефіцієнта гармонік K_r .

Для іншого варіанту розглянемо схему аналогічну попередній з такимиж значеннями параметрів та принципом роботи. Відмінною буде лише амплітуда розгортаючої напруги. Форму напруги виберемо трикутну з амплітудою $U_p = 5$ В та частотою $f_p = 1$ кГц. Опорна напруга залишеться незмінною $U_{op} = 3,5$ В. На рисунку 3.4 показано алгоритм керування регулятора.

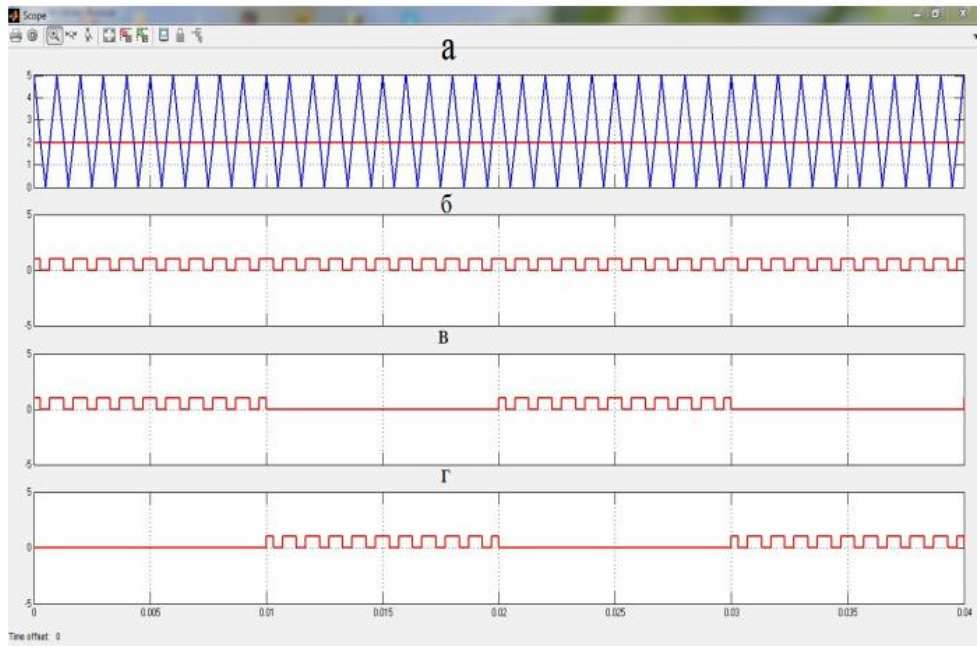


Рисунок 3.4. Алгоритм керування ключами напруги U_H , а) порівняння опорної напруги з пилоподібною, б) сигнали після порівняння U_{op} та U_p , в) сигнали, з VT 1,4, г) сигнали з VT 2,3

На рисунку 3.5 показано результати моделювання інвертора при $U_{AB} = 14$ В, з використанням класичного алгоритму регулювання частотою $f_p = 1$ кГц,

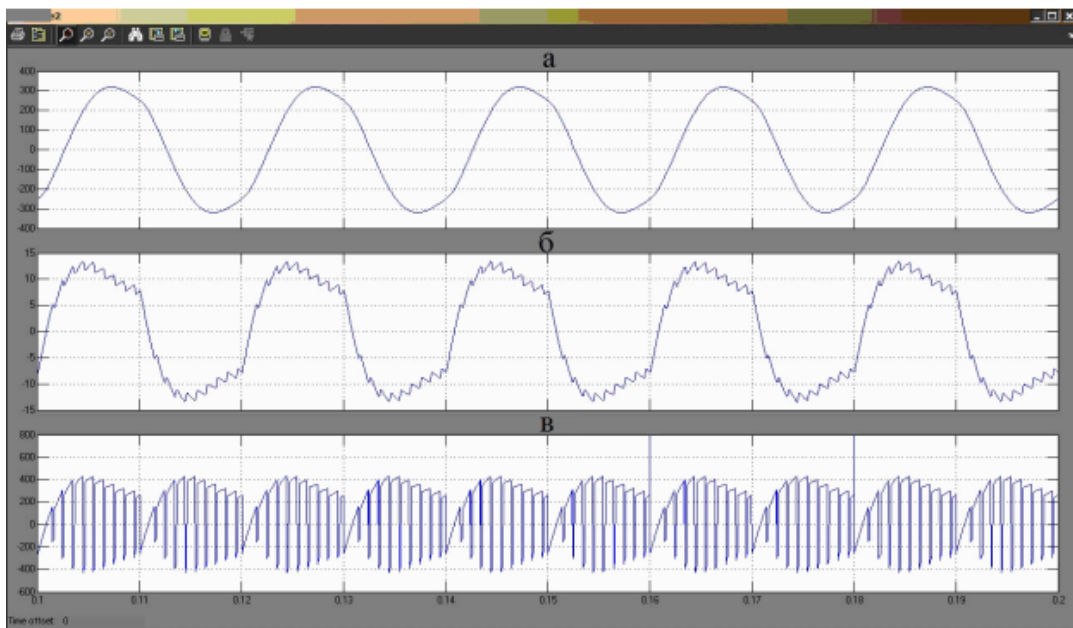


Рисунок 3.5 Осцилограми сигналів ФЕУ: а) вихідна напруга інвертора; б) струм навантаження; в) струм на вході інвертора

Результати регулювання напруги U_H за класичним алгоритмом керування приведено на рисунку 3.6. Отримані характеристики при використанні $f_p=1\text{кГц}$, U_H - синя суцільна лінія, K_r - пунктирна синя лінія. Такі ж результати моделювання показано при частоті $f_p=100\text{ Гц}$. U_H - червона суцільна лінія, K_r – пунктирна червона лінія.

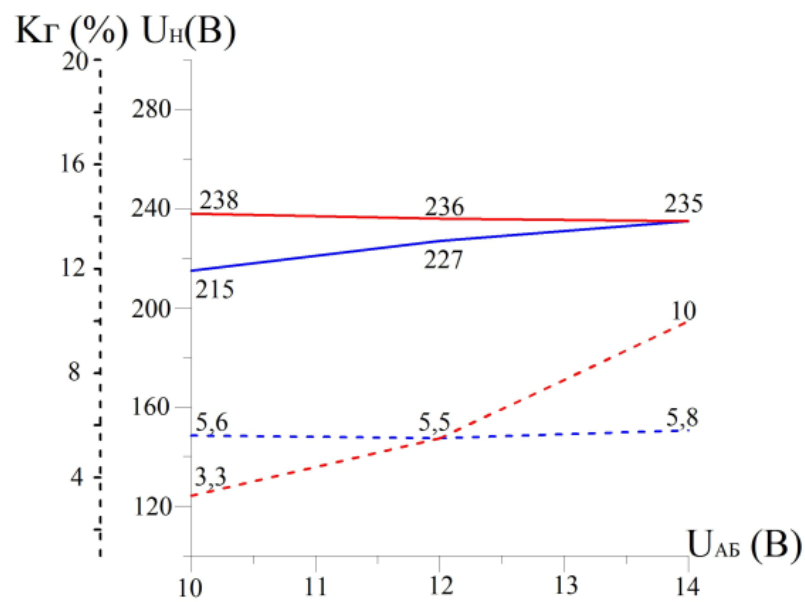


Рисунок 3.6 Результати регулювання U_H з класичним алгоритмом керування

Проведені вище дослідження показують що запропонований алгоритм регулювання напруги забезпечує необхідну точність рівня вихідної напруги, а коефіцієнт гармонік $K_r = 6\%$.

3.2 Регулятор із широтно-імпульсною модуляцією

Принцип роботи ШІМ регулятора полягає в порівнянні пилкоподібної опорної напруги з випрямленою напругою мережі, за допомогою зменшеного дільника напруги до величини опорної напруги пилкоподібної форми (рисунок 3.7). Амплітуда пилкоподібної напруги вибиралася рівною 10 В при $U_{AB} = 10 - 14\text{ В}$. Коли мережева напруга перевищує пилкоподібну напругу

закриваються силові транзистори. Для їх відкриття необхідно щоб імпульси пілкоподібної напруги перевищили випрямлену напругу мережі.[9]

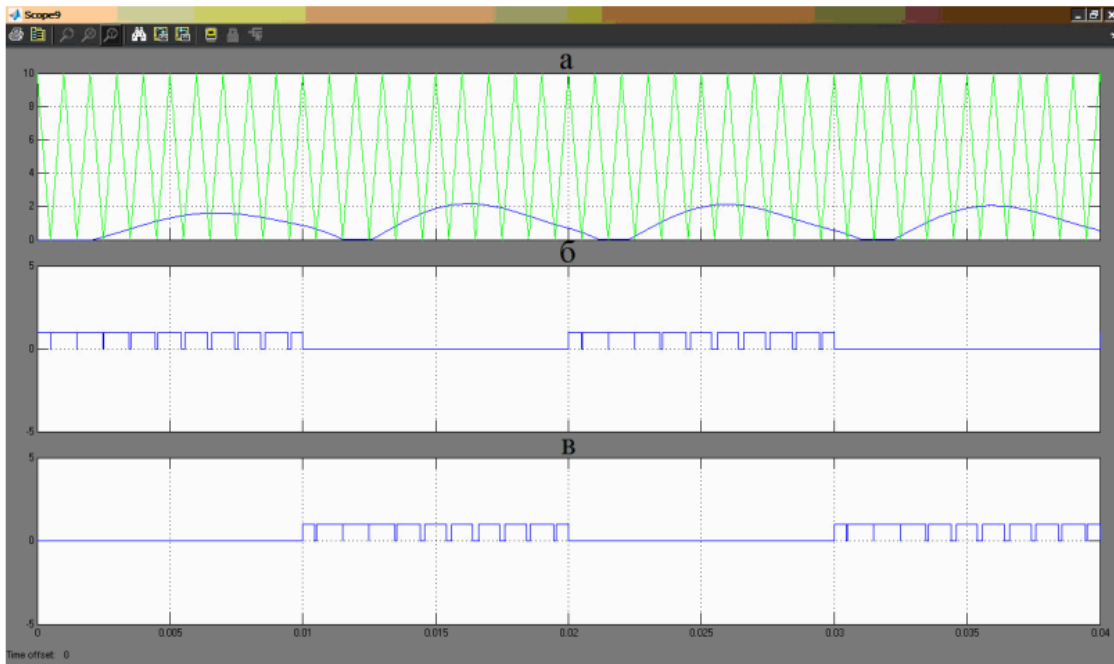


Рисунок 3.7 а) Порівняння опорної напруги з випрямленою; б) Напруга на транзисторах VT1 і VT4; в) Напруга на транзисторах VT2 і VT3

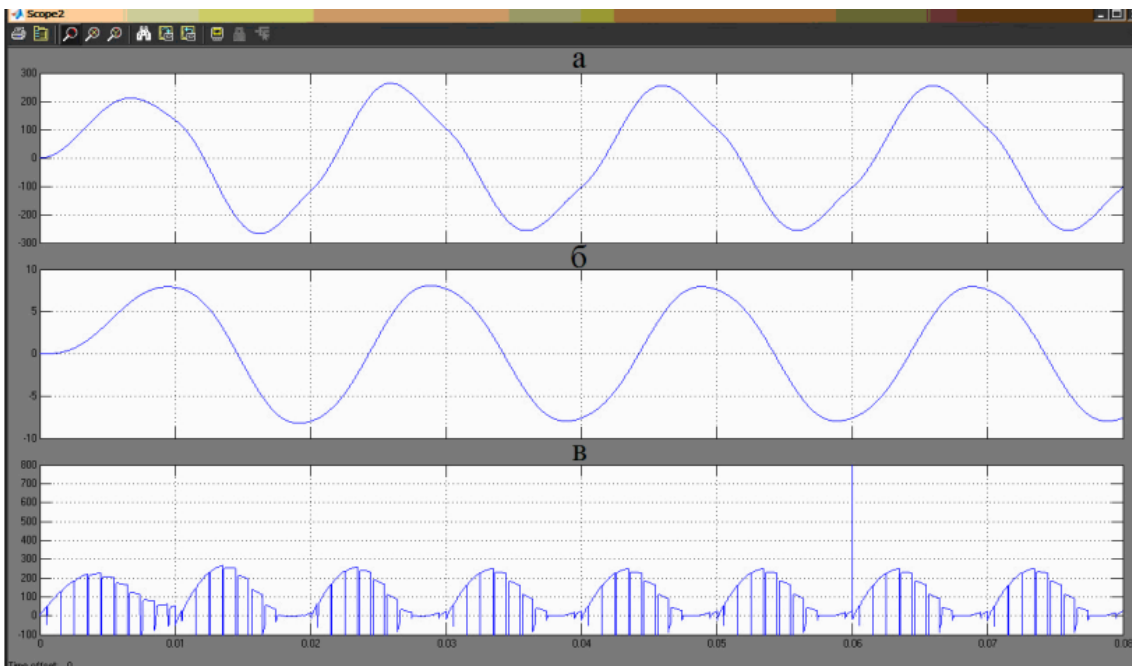


Рисунок 3.8 Криві сигналів моделювання при $U_{AB} = 14$ В: а) Вихідна напруга інвертора. б) Струм навантаження. в) Струм джерела живлення

Значення параметрів моделювання наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 Результати моделювання

| Напруга АБ, U_{AB} (В) | Напруга на навантаженні, U_{H2} (В) | Коефіцієнт нелінійних спотворень K_{Γ} (%) |
|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 10 | 221,3 | 4,03 |
| 11 | 229,9 | 4,23 |
| 12 | 227 | 4,47 |
| 13 | 231,1 | 4,57 |
| 14 | 230 | 4,85 |

У цій схемі реалізовано параметричну стабілізацію напруги, але не забезпечено формування синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Це призводить до зворотної логіки в контексті форми напруги, де тривалість імпульсів з обох боків напівперіоду збільшується, а стабільність вихідної напруги залишається низькою.

Згідно з дослідженням, зміна напруги акумуляторної батареї (АБ) на 40% - від 10 до 14 вольт - викликає зміну вихідної напруги U_{H2} на 4% - від 221 до 231,3 В. Цей метод забезпечує необхідний діапазон зміни напруги $\pm 10\%$. Перевагою такого способу регулювання є підтримка необхідного рівня напруги U_{H} з мінімальними змінами коефіцієнта спотворень.

3.3 Вплив додаткового несиметричного імпульсу навантаження на роботу інвертора.

Діаграма включення додаткового несиметричного навантаження показано на рисунку 3.9.

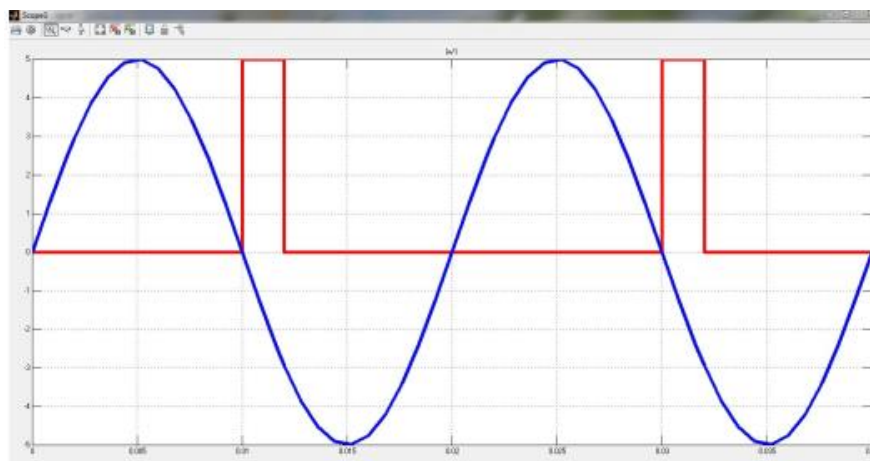


Рисунок 3.9 Осцилограма включення додаткового імпульсного навантаження

Осцилограми вихідної напруги U_H , вихідного струму I_H та струм джерела живлення I_D , при регулюванні з широтно-імпульсною модуляцією показано на рисунку 3.10. З графіків, що модуляція вихідної напруги інвертора відсутня

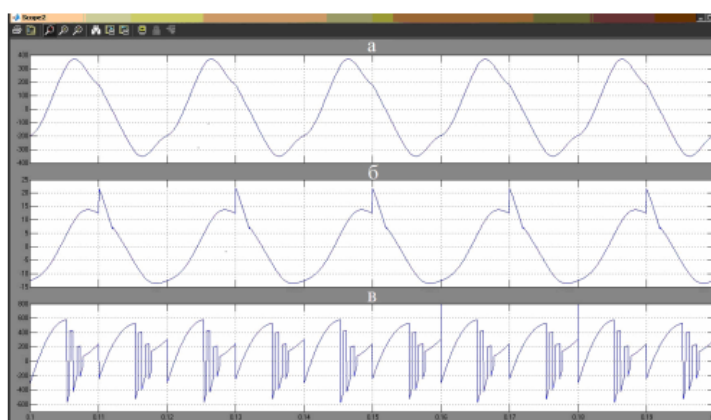


Рисунок 3.10 Результати моделювання а) напруга на виході внвертора, б) струм навантаження в) струм на вході інвертора.

На рисунку 3.11 представлені результати порівняння методів регулювання на основі широтно-імпульсної модуляції (рис. 3.11б) та класичного алгоритму регулювання (рис. 3.11а). Дослідження проводилося при напругах акумуляторної батареї $U_{AB} = 10\text{ В}$ і 14 В , з урахуванням впливу додаткового несиметричного імпульсного навантаження.[10]

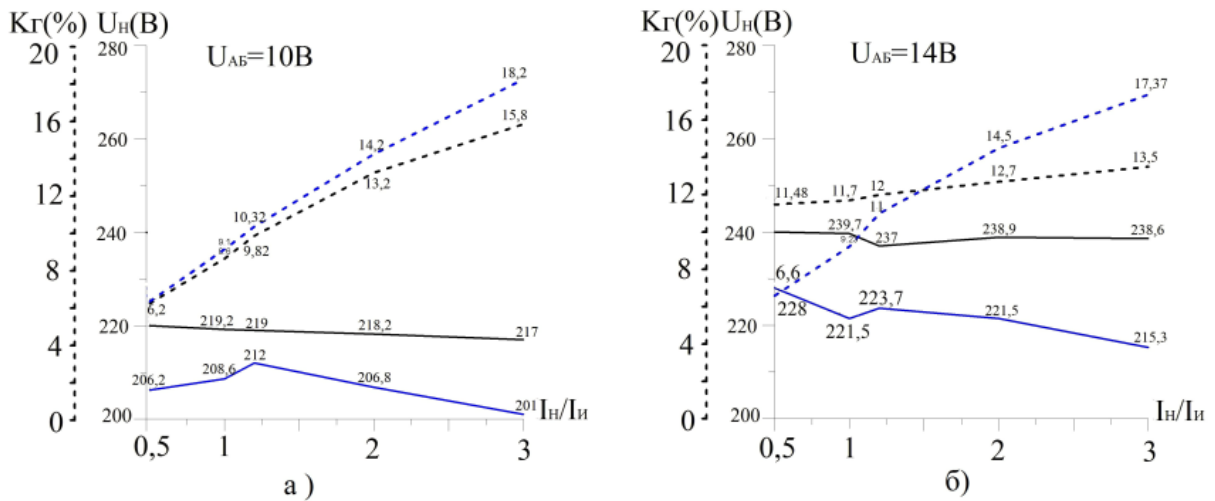


Рисунок 3.11 Результати дослідження впливу на роботу інвертора додаткового імпульсного навантаження

На рисунку 3.11 представлені порівняльні результати дослідження класичного алгоритму регулювання (КАР) і широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) при напругах акумуляторної батареї $U_{AB} = 10V$ та $14V$ з увімкненням додаткового несиметричного імпульсного навантаження. Синя суцільна лінія відображає стабільність вихідної напруги U_n для КАР, тоді як синя пунктирна лінія ілюструє коефіцієнт гармонік (K_G). Чорна суцільна лінія представляє U_n для ШИМ, а чорна пунктирна лінія — відповідний K_G .

Дослідження показує, що при $U_{AB} = 14V$ і підключенні додаткового імпульсного навантаження, КАР забезпечує стабільність U_n з коефіцієнтом регулювання $K_u = 1,1$, а K_G змінюється в межах від 6,6% до 18%, незважаючи на те, що при номінальному навантаженні K_G менше 6%. Це вказує на суттєве зростання гармонічних спотворень при підвищеному навантаженні.

З іншого боку, ШИМ забезпечує стабільність U_n з коефіцієнтом регулювання $K_u = 1$, при цьому K_G змінюється в діапазоні від 11,48% до 14%. Незважаючи на те, що ШИМ показує дещо вищий K_G у порівнянні з КАР, він забезпечує більш точну підтримку вихідної напруги U_n і стабільніші значення K_G при змінних умовах навантаження.

Таким чином, результати дослідження свідчать про те, що ШІМ-метод перевершує КАР у точності підтримки вихідної напруги U_H і стабільності K_T , хоча КАР може забезпечувати нижчі гармонічні спотворення при номінальному навантаженні.

Для реалізації системи керування резервним джерелом живлення було вибрано інвертор АХІОМА Energy ISPWM 1000, Його вигляд та технічні характеристики показано на рисунку 3.12.



| | |
|----------------------------------------|--------|
| Номінальна потужність навантаження, Вт | 800 |
| Час перемикання, мс | 10 |
| Вихідна напруга АКБ, В | 12 |
| Максимальний струм заряду, А | 50 |
| Режим заряду АКБ | ШІМ |
| Діапазон вхідної напруги АС, В | 90-280 |
| ККД, % | 91 |

Рисунок 3.12 Інвертор АХІОМА Energy ISPWM 1000

3.4 Розрахунок ймовірності безвідмовної роботи акумуляторної батареї

Ймовірність безвідмовної роботи акумуляторної батареї яка складається з m послідовно з'єднаних елементів буде розраховуватися:

$$P(t) = e^{-m \cdot \lambda \cdot t} = \frac{1}{e^{m \cdot \lambda \cdot t}} \quad (3.1)$$

де, $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи, λ – інтенсивність відмов, t – час роботи.

У випадку спроектованої системи виберемо λ рівним 10^{-6} , час роботи становить 20 років= 26380 год. В розділі було розраховано необхідну кількість акумуляторів, що становить $m = 5$. Розрахуємо ймовірність безвідмовної роботи акумуляторної батареї при вихідній напрузі 220 В.

$$P(t) = e^{-m \cdot \lambda \cdot t} = \frac{1}{e^{5 \cdot 10^{-6} \cdot 26380}} = 0.9$$

Висока ймовірність безвідмовної роботи означає, що відсутня необхідність у розробці спеціальних методів підвищення надійності акумуляторної батареї. Такі заходи, як резервування, заміна батарей раніше, ніж через три роки, або індивідуальний контроль кожного акумулятора, не потребують впровадження. Згідно з дослідженнями, за наявності п'яти батарей, жодна з них не вийде з ладу протягом трьох років експлуатації.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Заходи безпеки при роботі з електроустановками.

Струмоведучі частини електроустановки повинні бути недоступними для випадкового прямого дотику до них, а доступні для дотику відкриті її частини і сторонні провідні частини не повинні знаходитися під напругою, яка становить небезпеку ураження електричним струмом як у нормальному режимі роботи електроустановки, так і при пошкодженні її ізоляції. [11]

Для захисту від ураження електричним струмом при прямому дотику повинні застосовуватись, окремо або в поєднанні, такі основні заходи захисту:

- основна ізоляція струмоведучих частин;
- огорожі і оболонки;
- бар'єри;
- розміщення поза зоною досяжності;
- наднизька (мала) напруга. Для додаткового захисту від прямого дотику

в електроустановках

напругою до 1 Кв можуть застосовуватись ПЗВ.

Захист від прямого дотику не вимагається, якщо номінальна напруга не перевищує:

- 25 В змінного або 60 В постійного струму при застосуванні системи БННН, а також системи ЗННН у випадку, коли

електрообладнання

експлуатується тільки в сухих приміщеннях і знаходиться в зоні дії системи зрівнювання потенціалів, а ймовірність контакту людини з частинами, які знаходяться під напругою, мала;

- 6 В змінного або 15 В постійного струму у всіх інших випадках.

Для захисту від ураження електричним струмом при непрямому дотику повинні застосовуватись, окремо або в поєднанні, такі заходи захисту:

- захисне заземлення;

- автоматичне вимикання живлення;
- зрівнювання потенціалів;
- вирівнювання потенціалів;
- подвійна або посилена ізоляція;
- захисний електричний поділ кіл;
- ізолюючі (непровідні) приміщення, зони, площадки;
- наднизька (мала) напруга.

Захист від непрямого дотику слід виконувати в усіх випадках, якщо напруга електроустановці перевищує 50 В змінного і 120 В постійного струму. В приміщеннях з підвищеною небезпекою, в особливо небезпечних і в зовнішніх установках виконання захисту від непрямого дотику може знадобитися при більш низьких напругах, наприклад: 25 В змінного і 60 В постійного струму або 12 В змінного і 30 В постійного струму за наявності відповідних вимог до конкретних електроустановок або електроприймачів.

Заходи захисту від ураження електричним струмом повинні бути передбачені в електроустановці чи її частині або застосовані до окремих електроприймачів і можуть бути реалізовані при виготовленні електрообладнання, або в процесі монтажу електроустановки чи в обох випадках. Застосування двох і більше заходів захисту в електроустановці не повинно чинити взаємного впливу, що знижує ефективність кожного з них.

Для захисного заземлення електроустановок можуть бути використані штучні і природні заземлювачі. В першу чергу слід використовувати природні заземлювачі. Якщо при використанні природних заземлювачів опір заземлювальних пристроїв задовольняє пред'явлені до них вимоги, то виконання штучних заземлювачів в електроустановках напругою до 1 кВ не обов'язкове. Використання природних заземлювачів як елементів заземлювальних пристроїв не повинно приводити до їх ушкодження при протіканні по них струмів короткого замикання або до порушення роботи пристроїв, з якими вони зв'язані.

Для заземлення в електроустановках різних призначень і напруг, територіально зближених, необхідно, як правило, застосовувати один спільний заземлювальний пристрій.

Заземлювальний пристрій, який використовується для заземлення електроустановок одного або різних призначень і напруг, повинен задовольняти усі вимоги, висунуті до заземлення цих електроустановок: захист людей від ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції; умови режимів роботи мереж; захист електрообладнання від перенапруги; електромагнітну сумісність комп'ютерних і мікропроцесорних систем, РЗА і АСУ ТП, які застосовуються у цих електроустановках, тощо - протягом усього періоду експлуатації. В першу чергу повинні дотримуватись вимоги, висунуті до захисного заземлення.

При виконанні незалежного окремого заземлювача для функціонального заземлення за умовами роботи інформаційного або іншого чутливого до впливу перешкод устаткування повинні бути вжиті спеціальні заходи захисту від ураження електричним струмом, які виключають одночасний дотик до частин, що можуть при ушкодженні ізоляції опинитися під небезпечною різницею потенціалів.

Для об'єднання заземлювальних пристроїв різних електроустановок в один спільний заземлювальний пристрій можуть бути використані природні і штучні заземлювальні провідники при їх кількості не менше двох.

Необхідні значення напруг дотику і опорів заземлювальних пристроїв при стіканні з них струмів замикання на землю і струмів витoku повинні бути забезпечені при найбільш несприятливих умовах у будь-яку пору року.

При визначенні опору заземлювальних пристроїв повинні враховуватися штучні і природні заземлювачі. При визначенні питомого опору землі за розрахункове слід приймати його сезонне значення, яке відповідає найбільш несприятливим умовам. Заземлювальні пристрої повинні бути механічно міцними та динамічно стійкими до струмів замикання на землю і не повинні

термічно ушкоджуватись за час їх протікання. Матеріал і переріз заземлювачів повинні забезпечувати їх стійкість до корозії на весь період експлуатації.

Електроустановки напругою до 1 кВ житлових, громадських і промислових будинків, приміщень для утримування тварин і зовнішніх установок повинні, як правило, отримувати живлення від джерела з глухозаземленою нейтраллю із застосуванням системи заземлення TN. Вимоги до вибору системи TN-C, TN-S, TN-C-S для конкретних електроустановок подаються у відповідних главах ПУЕ.

TN-S система заземлення – нульовий робочий та нульовий захисний провідники працюють окремо в усій системі. TN-C-S система заземлення – функції нульового робочого та нульового захисного провідників об'єднані в одному провідникові в частині мережі.

TN-C система заземлення – функції нульового робочого та нульового захисного провідників об'єднані в одному провідникові в усій мережі.

ІТ-система заземлення – мережа живлення системи ІТ не має безпосереднього зв'язку струмовідних частин з землею, а відкриті струмопровідні частин електроустановки заземлені.

L – фазний провідник.

N – нульовий робочий провідник.

PE – нульовий захисний провідник.

PEN – об'єднаний нульовий робочий та захисний провідник.

Для захисту від ураження електричним струмом при непрямому дотику в електроустановках із системою TN повинно виконуватися автоматичне вимикання живлення відповідно до підрозділу 1.4. На повітряних лініях мереж з системою TN повинно виконуватись повторне заземлення PEN- провідника відповідно до вимог підрозділу 1.6. Рекомендується також виконувати повторне заземлення PEN (PE) – провідника на ввіді в електроустановки будинків згідно з підрозділом 1.6. В середині великих і багатоповерхових будинків аналогічну функцію виконує зрівнювання потенціалів шляхом

приєднання нульового захисного провідника до головної заземлювальної шини.

4.2 Норми проектування енергетичних об'єктів

Заходи щодо підвищення стійкості об'єктів енергетики здійснюють відповідно до вимог Норм проектування інженерно-технічних заходів, які починають діяти після прийняття постанови урядом. Вимоги норм призначені для того, щоб в умовах НС:

- забезпечити захист населення та знизити масштаби руйнувань (пожеж, затоплень, заражень);
- підвищити стійкість роботи об'єктів господарювання і галузей економіки;
- створити умови для успішного проведення робіт з ліквідації наслідків НС.

Вимоги норм проектування реалізують під час проектування та забудови міст, будівництва нових промислових підприємств, об'єктів енергетики, транспортних систем, систем водо- та газопостачання, а також під час їх реконструкції.

Головним документом, відповідно до якого слід планувати та здійснювати інженерно-технічні заходи цивільного захисту (ІТЗ ЦЗ) є «Будівельні норми і правила» (БН і П 2.00.05-90), а також «Загальні вимоги до розвитку і розміщення потенційно небезпечних виробництв з урахуванням ризику надзвичайних ситуацій техногенного походження» (Київ, НАН України, 1995). Запровадження норм проектування ІТЗ ЦЗ здійснюється диференційовано з урахуванням ролі і важливості міст і об'єктів економіки. Для цього міста поділяють на групи, а об'єкти – на категорії за такою класифікацією: міста: «Особливої групи», I, II та III груп; об'єкти господарювання: «Особливої важливості», I та II категорій. Об'єкти атомної енергетики виділяють в окрему групу.

Для «категорійних» міст і об'єктів з метою реалізації ІТЗ встановлено дві зони: можливих слабких руйнувань, де очікується (за прогнозом)

надмірний тиск у фронті повітряної УХ $P_{\phi} = 10\text{--}30$ кПа; можливих сильних руйнувань, у межах якої очікується $P_{\phi} 30$ кПа.

Межа зони сильних руйнувань для міст «особливої», I, II, III груп пролягає в межах проектної забудови міста (ПЗМ), а зони слабких руйнувань – на відстані 7 км від межі проектної забудови міста (ПЗМ приймають відповідно до затвердженого генерального плану забудови на розрахунковий період). Для об'єктів «особливої важливості» межа зони сильних руйнувань пролягає на відстані 3 км від межі проектної забудови об'єкта; слабких – 10 км

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу погодинного розподілу електропостачання приватного будинку було розраховано, що сумарне добове споживання електроенергії становить 10,85 кВт·год, а Середня спожита потужність впродовж дня 0,6 кВт

2. На основі проведеного статистичного аналізу з шести типів акумуляторних батарей було обрано гелеву акумуляторну батарею GX 12-200 за наступними критеріями: відсутність необхідності в обслуговуванні та максимальна енергетична щільність, що досягає 180 Вт/кг. Для обраної акумуляторної батареї також визначено метод захисту від перенапруги та короткого замикання.

3. Розраховано площу сонячної батареї на основі рівності середньої потужності навантаження і середньої питомої потужності, яка становить 12 м², Для проектування ФЕУ рекомендовано використати сонячні панелі марки PSM4 150W

4. Було розглянуто два методи автоматичної стабілізації вихідної напруги інвертора: релейний регулятор напруги та регулятор з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Релейний регулятор підтримує вихідну напругу в діапазоні від 221,1 до 231,6 В з коефіцієнтом гармонік, що коливається в межах від 5,71% до 14%. Натомість регулятор з ШІМ забезпечує вихідну напругу в діапазоні від 221,3 до 277,1 В з коефіцієнтом гармонійних спотворень від 4,03% до 4,82%. Для реалізації системи керування резервним джерелом живлення було вибрано інвертор AXIOMA Energy ISPWM 1000,

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Комбіновані фотоенергетичні системи [Текст] / Р. В. Зайцев, Г. С. Хрипунов, М. В. Кіріченко, А. В. Меріуц . –Харків :Бровін О. В.,2020 . – 322 с
2. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії: Навчальний посібник О.І.Соловей, Ю.Г. Лега, В.П. Розен, О.О. Ситник, А.В. Чернявський, Г.В. Курбака; За заг. ред. О.І. Солов'я. – Черкаси: ЧДТУ, 2007.
3. Vadym Koval, Serhii Martsenko, Myroslav Zin (2023). Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. The 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 14-16, Vol. 3468, Pages 241-249.
4. Тарасенко, М. Енергоефективність акумулювання сонячної енергії в приватному секторі [Текст] / М. Тарасенко, Р. Гаврилишин // Матеріали XXI наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя, 16-17 травня 2019 року . – Тернопіль: ТНТУ, 2019 . – С. 127-128 . – (Електротехніка і світлотехніка, електроніка)
5. Філюк, Я. Експериментальні вимірювання енергетичного потенціалу сонячного випромінювання [Текст] / Я. Філюк, В. Андрійчук // Матеріали XX наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 17-18 травня 2017 року: збірник тез доповідей . – Тернопіль: ТНТУ, 2017. - С. 176–177. – (Електротехніка та світлотехніка, електроніка)
6. Атлас енергетичного потенціалу нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії. – К., 2008. – 54 с.
7. Teodorescu, R., Liserre, M., & Rodriguez, P. (2011). Grid converters for photovoltaic and wind power systems. John Wiley & Sons.
8. International Energy Agency, "Technology Roadmap - Solar Photovoltaic Energy," International Energy Agency, Paris, 2014.
9. T.-J.-F. Kuo Y-C, "Novel Maximum-Power-Point-Tracking Controller for Photovoltaic Energy Conversion System.," IEEE Transactions On Industrial Electronics, vol. 48, no. 3, pp. 594-601, 2001.

10. M. Abdul Ghafoor, "Design and economics analysis of an off-grid PV system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , vol. 42, pp. 496-502, 2015.

11. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.