

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Вибір алгоритму пошуку точки максимальної
потужності в пристроях альтернативної енергетики**

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

електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Ворон І. І.
(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Наконечний М.С.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мовчан Л. Т.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Коваль В. П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Дідич І. С.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В. П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

20__ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Ворону Івану Івановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Вибір алгоритму пошуку точки максимальної потужності в пристроях
альтернативної енергетики

Керівник роботи Наконечний Мирослав Степанович, кандидат технічних наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «31» грудня 2025 року № 4/7-1164

2. Термін подання студентом завершеної роботи червень 2026 року

3. Вихідні дані до роботи Електротехнічні характеристики сонячної панелі

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Аналітичний розділ

2 Розрахунково-дослідницький розділ

3 Проектно-конструкторський розділ

4 Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

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

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, 2026.

Стор. 58; рис. 38; табл. 2; джерел 12; додатків 0.

В роботі проведено порівняльний аналіз та дослідження процесів пошуку точки максимальної потужності (ТМП) фотоелектричних систем із використанням адаптивного та класичного (неадаптивного) алгоритмів збурення та спостереження.

За результатами проведеного комп'ютерного моделювання встановлено суттєві переваги адаптивної модифікації регулятора. На відміну від базового алгоритму з фіксованим кроком, адаптивний метод забезпечує динамічне масштабування величини збурення залежно від відстані до екстремуму. Це дозволило мінімізувати амплітуду високочастотних автоколивань і пульсацій параметрів сонячної батареї (струму, напруги та вихідної потужності) у сталому статичному режимі. Крім того, розроблений адаптивний алгоритм продемонстрував високу точність локалізації ТМП (на рівні 95–99%) та підвищену швидкодію при відпрацюванні стрімких змін інтенсивності сонячної інсоляції, що мінімізує динамічні втрати енергії в сильних перехідних процесах.

Ключові слова:

СХЕМА КУКА, ПІДВИЩУВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ПОНИЖУВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ВІДСТЕЖЕННЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ, МЕТОД ЗБУРЕННЯ ТА СПОСТЕРЕЖЕННЯ..

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1 Аналіз схем заміщення фотоелектричного модуля.....	8
1.2 Огляд методів моделювання теоретичних кривих фотоелементів	13
1.3 Методи підвищення енергоефективності та стабілізації роботи сонячних електростанцій.....	16
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	18
2.1 Вибір типу перетворювача	18
2.3. Широтно-імпульсне регулювання.....	25
2.4 Розрахунок параметрів перетворювача схеми Кука.....	27
2.4 Розрахунок підвищувального та інвертуючого перетворювача	30
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	35
3.1 Моделювання режимів освітленості сонячної батареї.....	35
3.2. Моделювання роботи перетворювача напруги з екстремальним регулюванням зі схемою Кука.....	36
3.3. Моделювання роботи перетворювача напруги з екстремальним регулюванням з підвищувальним перетворювачем	40
3.4. Моделювання роботи перетворювача напруги з екстремальним регулюванням з інверторним перетворювачем	43
3.5 Порівняння роботи адаптивного та неадаптивного алгоритму роботи збурення в схемі Кука.....	47
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	51
4.1 Дія електричного струму на організм людини	51
4.2 Фактори, що впливають на ступінь ураження людини електричним струмом	53
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	56
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	57

ВСТУП

Сьогодні, в умовах глобального переходу до чистої енергетики та боротьби зі змінами клімату, сонячна енергетика стала одним із найважливіших альтернативних джерел захисту довкілля. Поступова відмова від викопного палива та перехід на відновлювані джерела енергії вимагають постійного вдосконалення технологій, які дозволяють ефективно вловлювати, перетворювати та зберігати сонячну енергію. Головним елементом таких систем є сонячні панелі. Їхня робота базується на властивостях напівпровідників, які під дією сонячного світла напряму генерують електричний постійний струм.

Для забезпечення високої ефективності передачі енергії від фотоелектричних панелей до накопичувальних систем або споживачів важливим є використання проміжних ланок силової електроніки. Зокрема, застосовуються вторинні джерела живлення у вигляді напівпровідникових DC-DC перетворювачів, які виконують функцію стабілізації напруги та узгодження параметрів джерела з характеристиками навантаження. У складніших конфігураціях, що передбачають інтеграцію в локальну мережу або живлення споживачів змінного струму, систему доповнюють автономними інверторами з відповідними алгоритмами синхронізації.

Ефективність функціонування фотоелектричних систем суттєво обмежена нелінійним характером їхніх вольт-амперних (ВАХ) та вольт-ватних характеристик (ВВХ), що залежать від рівня інсоляції та температури навколишнього середовища.

Для мінімізації енергетичних втрат і забезпечення роботи системи в точці максимального відбору потужності застосовується спеціалізована технологія керування — Maximum Power Point Tracking (MPPT). Алгоритми MPPT здійснюють динамічне регулювання коефіцієнта заповнення імпульсів керування силовими ключами DC-DC перетворювача, адаптуючи систему до змінних зовнішніх умов у режимі реального часу.

Метою роботи є дослідження функціонування MPPT-контролера на базі класичних топологій DC-DC перетворювачів: підвищувального, інвертуючого та перетворювача з топологією Кука. В основі системи керування лежить адаптивний алгоритм екстремального регулювання потужності.

Завданням роботи є визначення типу напівпровідникового перетворювача, який забезпечить найбільш ефективний пошук точки максимальної потужності з мінімальним коефіцієнтом пульсацій вихідної напруги та найвищою точністю локалізації екстремуму ВВХ.

Виконати порівняння показників статичної та динамічної похибок системи при застосуванні різних схем силової частини.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Аналіз схем заміщення фотоелектричного модуля

Геліоенергетика належить до відновлюваних і практично невичерпних енергоресурсів, що характеризуються високим рівнем екологічної безпеки та низькою собівартістю генерації. З огляду на прогресуюче вичерпання викопного палива, інтенсифікація використання сонячної енергії в синергії з іншими альтернативними джерелами є пріоритетним вектором розвитку світового енергетичного сектору. Стрімке щорічне зниження капітальних і експлуатаційних витрат на фотоелектричні технології дозволить їм у середньостроковій перспективі скласти повноцінну конкуренцію традиційній тепловій та ядерній генерації.

На сучасному етапі напівпровідникові сонячні елементи інтегруються у різноманітні сфери: авіабудування, автомобільний транспорт, агропромисловий комплекс, архітектурно-будівельні конструкції та космічну індустрію. У регіонах із високими показниками інсоляції фотоелектричні системи децентралізовано застосовуються для забезпечення енергонезалежності житлового фонду. Лідерами за сумарною встановленою потужністю та темпами впровадження технологій є КНР, США, Індія та Японія. Географічну структуру та питому вагу провідних держав у глобальній сонячній генерації наведено на рис. 1.1.

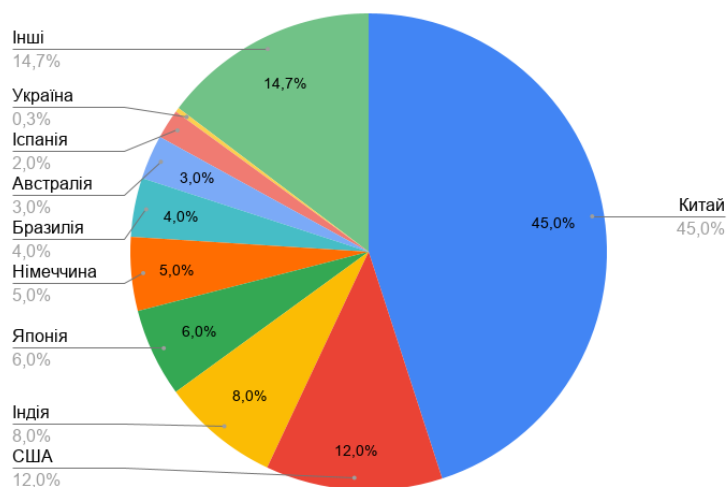


Рисунок. 1.1 – Частка світової сонячної генерації

Фотоелектричні елементи (ФЕ) є напівпровідниковими приладами, що забезпечують пряме конвертування енергії оптичного випромінювання в електричну. Генерація електрорушійної сили (ЕРС) у структурі ФЕ відбувається внаслідок поглинання фотонів та активації внутрішнього фотоелектричного ефекту. На сучасному етапі практична реалізація цього явища охоплює широкий спектр технологічних рішень. Поряд із класичними кремнієвими структурами, високий потенціал для підвищення ефективності перетворення демонструють інноваційні підходи на основі передових матеріалів, зокрема фотоактивні органічні полімери та структури з перовськітною архітектурою. Наразі найважливіші комерційні фотоелектричні підходи базуються на твердих напівпровідникових матеріалах, що утворюють р-п перехід для прийому енергії під час потрапляння на нього сонячного світла. Ця енергія на напівпровідникових матеріалах викликає збудження електронів, які проходять через перехід під дією електричного поля, що генерується утворенням р-п переходу. Підключення опроміненого напівпровідникового р-п-переходу до зовнішнього кола дозволяє електронам, що протікають через перехід, утворювати постійний струм. На рисунку 1.2 наведено базову ілюстрацію функціонування фотоелектричної комірки.

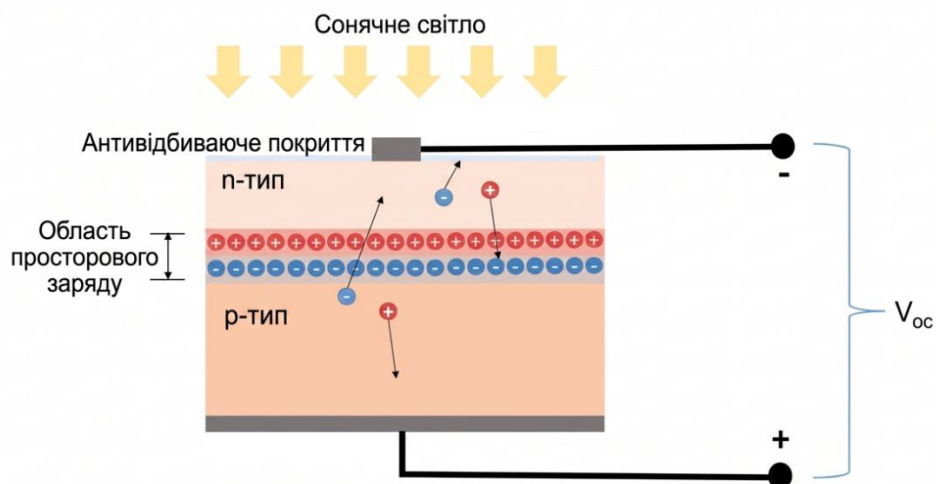


Рисунок 1.1 – Принцип роботи фотоелемента

Зі збільшенням інтенсивності сонячного випромінювання відбувається більше вивільнення електронів і фотонів, а з більшим потоком електронів виробляється більше струму, що означає, що струм короткого замикання (I_{sc}) прямо пропорційний інтенсивності сонячного випромінювання (G). Напруга відкритого контуру фотоелектричної комірки (V_{oc}) залежить від електричного поля, що утворюється в збідненій області напівпровідника, і не залежить суттєво від інтенсивності сонячного випромінювання

Для оптимізації ефективності фотоелектричних модулів необхідно точно описати динаміку їхніх параметрів в умовах експлуатації, на яку значний вплив мають погодні умови (інтенсивність сонячного випромінювання та температура) [1, 2]. Аналіз параметрів фотоелектричних модулів часто проводиться чисельним методом з метою прогнозування їхньої поведінки [3]. Відповідно, було розроблено різні аналітичні моделі для визначення цих параметрів із застосуванням різних чисельних стратегій для їхнього обчислення на основі аналітичних рішень [4]. Моделі з одним та двома діодами є найбільш поширеними для опису фотоелектричних модулів.

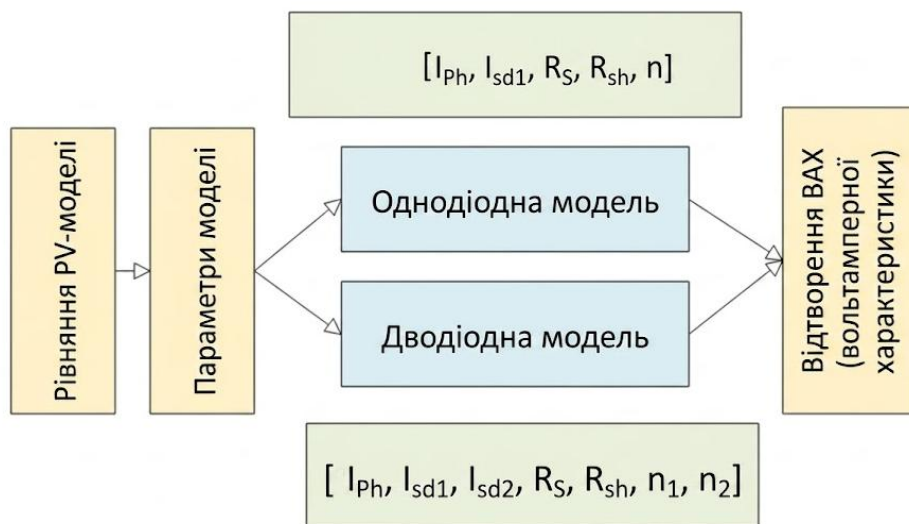


Рисунок 1.3 – Підходи до моделювання фотоелемента

Складність моделі залежить від кількості параметрів, що підлягають оцінці, та від даних про навколишнє середовище. Модель з одним діодом має перевагу простоти завдяки меншій кількості врахованих параметрів порівняно з моделлю з двома діодами. Загалом, за допомогою однодіодної моделі визначається п'ять параметрів. Однак однодіодна модель має свої обмеження, а також страждає від численних наближень, не враховуючи всіх фізичних явищ, що відбуваються під час роботи фотоелектричного модуля. Дводіодна модель пропонує кілька варіантів із збільшеною кількістю врахованих параметрів (від п'яти до семи), що забезпечує більш реалістичний опис фотоелектричного модуля [5]. Це пов'язано з тим, що в цій моделі враховані деякі явища, які відбуваються під час роботи фотоелектричного модуля, такі як рекомбінація електронів і дірок та теплові втрати.

Модель фотоелектричного модуля з одним діодом

Фотоелектричний модуль можна порівняти з електричною системою перетворення енергії [6].

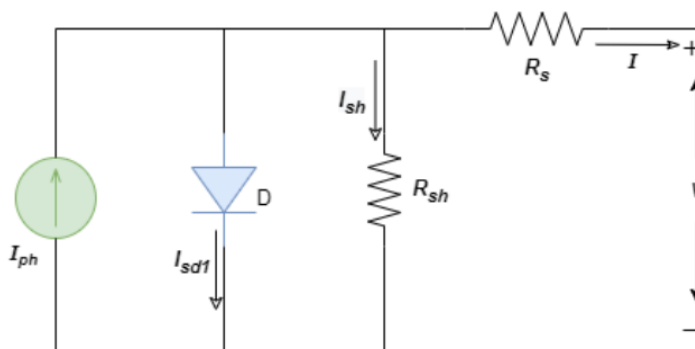


Рисунок 1.4 – Модель фотоелектричного модуля з одним діодом

Модель з одним діодом (рисунок 1.4) широко використовується для представлення електричних характеристик фотоелектричних систем завдяки простоті аналізу та точності, де джерело струму I_{ph} представляє фотострум комірки, I_{sd1} - зворотний струм фотодіода, R_{sh} та R_s - внутрішній шунтовий та

послідовний опір комірки відповідно, n представляє коефіцієнт ідеальності, значення якого має бути в межах від 1 до 2.

Струм на виводах (I) визначається таким чином:

$$I = I_{ph} - I_{sd1} - I_{sh} \quad (1.1)$$

Використовуючи рівняння Шоклі для діода, яке пов'язує струм діода з напругою на ньому, та підставляючи значення струму шунтового резистора, рівняння (1.1) можна спростити до рівняння (1.2).

$$I = I_{ph} - I_{sd1} \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}}\right) \quad (1.2)$$

З рівняння (1.2) випливає, що модель фотоелемента має п'ять невідомих параметрів: I_{ph} , I_{sd1} , R_s , R_{sh} та n .

Модель фотоелектричного модуля з двома діодами

Реалістична модель фотоелектричного модуля враховує різні втрати, зумовлені зовнішніми умовами та внутрішніми фізичними явищами, такими як рекомбінація електронів і дірок. Ці явища враховуються шляхом додавання другого діода. Рекомбінація відбувається, коли фотогенеровані електрони та дірки рекомбінують, що призводить до втрати фотоструму. Модель фотоелектричного модуля з одним діодом не враховує вищезазначене внутрішнє явище. Для реалізації більш реалістичної моделі фотоелектричного модуля можна розглянути моделі з двома діодами [7].

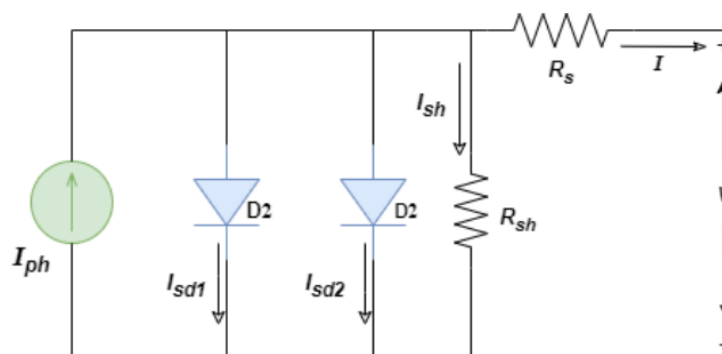


Рисунок 1.5 – Модель фотоелектричного модуля з двома діодом

Модель з двома діодами має ті самі параметри, що й модель з одним діодом, але з двома додатковими струмами насичення I_{sd1} та I_{sd2} та коефіцієнтами ідеальності n_1 та n_2 для першого та другого діодів відповідно, які відображають відповідні процеси дифузії та рекомбінації. Завдяки наявності другого діода досягається вищий рівень точності, особливо при низьких рівнях випромінювання, порівняно з попередньою моделлю.

Згідно з рисунка 1.5, вихідний струм I можна записати у вигляді:

$$I = I_{ph} - I_{sd1} - I_{sd2} - I_{sh} \quad (1.3)$$

$$I = I_{ph} - I_{sd1} \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{n_1 kT}\right) - 1 \right] - I_{sd2} \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{n_2 kT}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}}\right) \quad (1.4)$$

Як видно з рівняння 1.4, модель з двома діодами має сім невідомих параметрів, а саме: I_{ph} , I_{sd1} , I_{sd2} , R_s , R_{sh} та n_1 , n_2 . При цьому I_{sd1} та I_{sd2} - це дифузійний струм та струм насичення для кожного діода D1 та D2, а n_1 та n_2 - коефіцієнти ідеальності дифузії та рекомбінації діодів. Коефіцієнт ідеальності (якості) діода зазвичай має значення від 1 до 2 для сонячних елементів з кристалічного кремнію, причому $n \approx 1$ для елементів, в яких переважає рекомбінація в об'ємних (квазінейтральних) областях, і $n \rightarrow 2$, коли переважає рекомбінація в збідненій області.

1.2 Огляд методів моделювання теоретичних кривих фотоелементів

Потужність, струм та напруга фотоелементів відображаються за допомогою двох кривих: крива струм-напруга $I-V$ показує кожну робочу точку струму та напруги, яка може виникнути у фотоелементі. Подібним чином, крива потужність-напруга $P-V$ демонструє всі робочі значення напруги та потужності, що генеруються фотоелементом.

На рисунку 1.6 показано теоретичні криві вихідної потужності фотоелектричного елемента, на яких максимальне значення струму для елемента позначено як I_{SC} , а максимальна напруга - як V_{OC} .

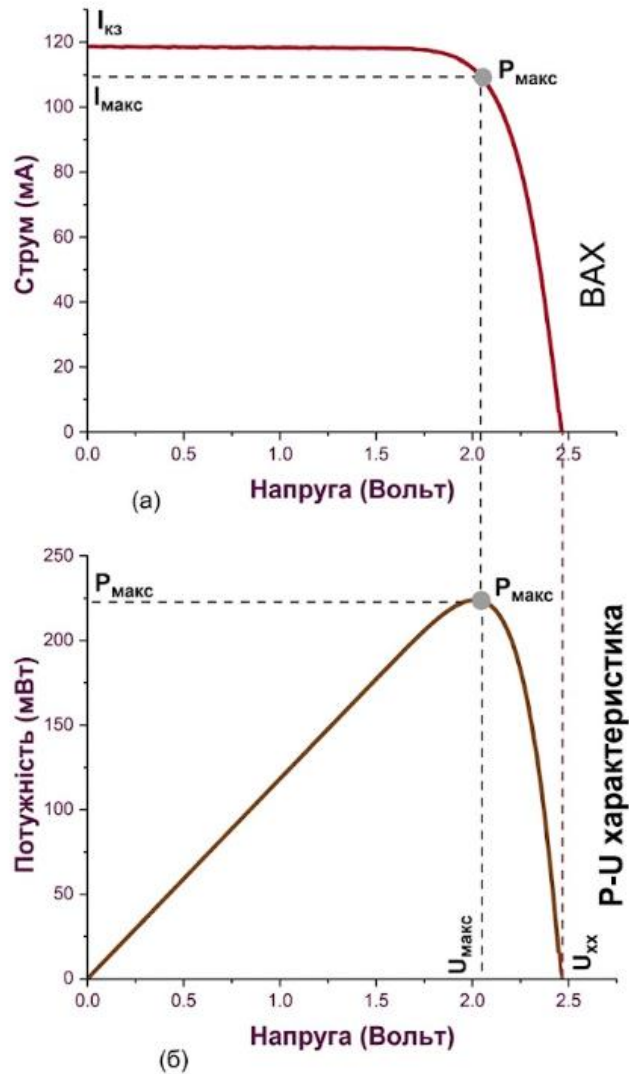


Рисунок 1.6 – а) крива I-V, б) крива P-V ідеального сонячного елемента.

На рисунку 1.6 показано стандартні криві I-V та P-V, побудовані за рівняннями 1.2 та 1.3, а також виділено типові точки на кривій I-V. Кути кривих I-V та P-V вказують на точку максимальної потужності (MPP), яка є оптимальною вихідною потужністю, що генерується елементом, і визначається шляхом вибору оптимального підключеного навантаження. MPP

представляє собою добуток напруги на струм, де значення напруги дорівнює V_{MPP} , а струму - I_{MPP} , що забезпечує найбільшу робочу вихідну потужність.

Струм короткого замикання: $I = I_{SC}$, $V = 0$

Точка максимальної потужності: $I = I_{max}$, $V = V_{MPP}$, P_{MPP} - максимальна потужність

Напруга холостого ходу: $V = V_{OC}$, $I = 0$.

Максимальна потужність P_{max} , яку можна отримати, визначається площею прямокутника, що має найбільшу площу під кривою I-V:

$$P = I \times V \quad (1.5)$$

Коефіцієнт заповнення (FF) — це загальний діагностичний показник, чутливий до втрат потужності, що виникають у результаті несправностей у фотоелектричних системах. FF є достатньо стійким до змін інтенсивності сонячного випромінювання та температурних режимів.

Коефіцієнт заповнення (FF) є мірою «прямокутності» кривої I-V і обчислюється за формулою:

$$FF = \frac{I_{MPP} \cdot V_{MPP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (1.6)$$

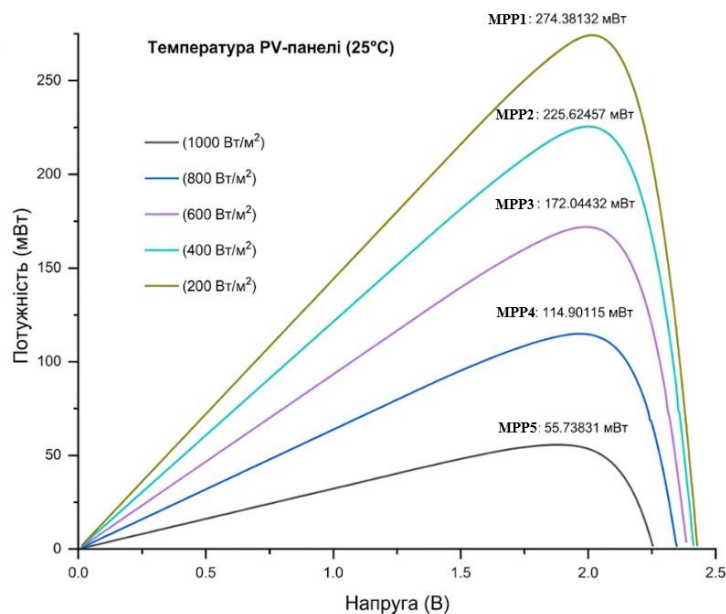


Рисунок 1.7 – P-V криві фотоелемента при різних рівнях освітленості

Коефіцієнт заповнення є хорошим показником, оскільки він залежить від змін напруги та струму в фотоелектричних модулях. На рисунку 1.7 показано P-V-криву фотоелектричного модуля, а також наведено параметри, що використовуються для розрахунку коефіцієнта заповнення.

1.3 Методи підвищення енергоефективності та стабілізації роботи сонячних електростанцій

Суттєвим недоліком фотоелектричних систем є детермінована стохастичність генерації: обсяг вихідної потужності безпосередньо залежить від інтенсивності сонячної інсоляції, тоді як профіль електроспоживання з не залежить від кліматичних чинників. Ця диспропорція зумовлює дефіцит потужності в енергосистемі, зокрема в нічний період доби. Для нівелювання зазначеної проблеми та стабілізації параметрів мережі застосовують такі інженерні рішення:

- інтеграцію систем акумулювання електричної енергії для депонування її надлишків;
- впровадження електромеханічних систем орієнтування (трекерів) для оптимізації кута падіння променів;
- застосування алгоритму пошуку точки максимальної потужності (MPPT).

Використання MPPT-регулювання потребує проектування високоефективних напівпровідникових силових перетворювачів та адаптивних систем керування ними. У фотоелектричних архітектурах базовими елементами є мережеві (on-grid, рис. 1.8) та автономні (off-grid, рис. 1.9) інвертори, конструкція яких передбачає наявність проміжної ланки постійного струму на вході DC-AC інвертора.

Специфіка функціонування автономного інвертора в умовах відсутності інсоляції вимагає підключення резервного джерела живлення. Це зумовлює

необхідність інсталяції акумуляторної батареї (АБ) у ланку постійного струму через узгоджувальний DC/DC-перетворювач, керований за принципом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). У топологіях мережевих інверторів DC/DC-перетворювач виконує подвійну функцію: розширює робочий діапазон напруги проміжної ланки та забезпечує динамічне відстеження екстремумів на вольт-амперній характеристиці (ВАХ) фотоелектричного модуля.

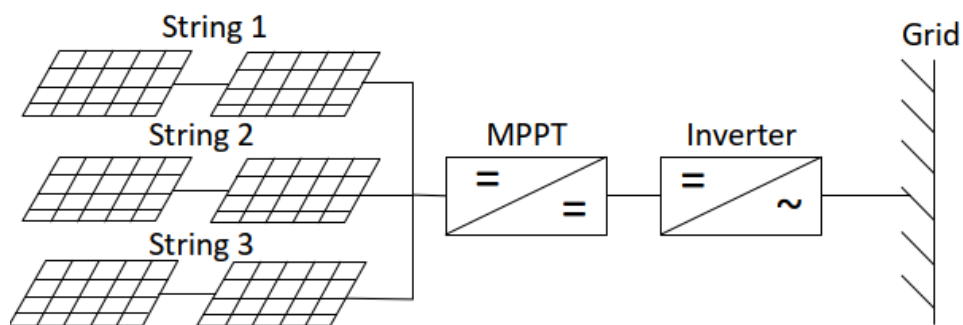


Рисунок. 1.8. Мережевий інвертор

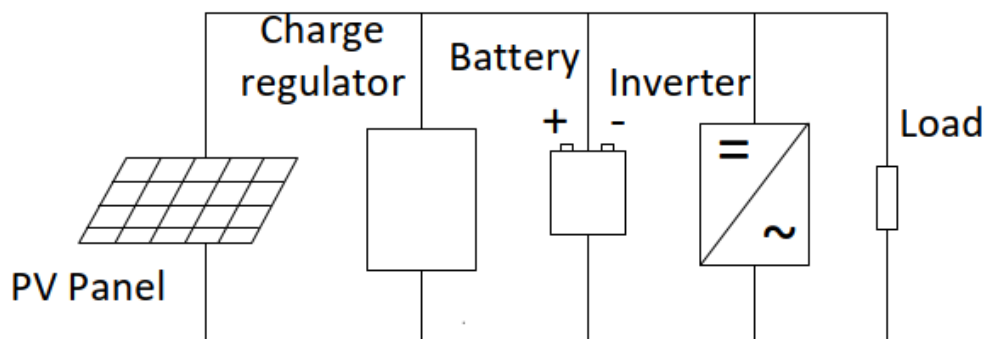


Рисунок 1.9 - Автономний інвертор СБ

Як було показано вище, вхідна ланка постійного струму інверторів обох конфігурацій реалізується на базі імпульсних DC-DC перетворювачів. Залежно від топології та функціональних вимог системи, у цих вузлах застосовують знижувальні (buck), підвищувальні (boost), інвертуючий (buck-boost) конвертори, а також перетворювачі, побудовані за схемою Кука (Ćuk converter).

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Вибір типу перетворювача

Підвищувальний імпульсний перетворювач постійної напруги є дискретним пристроєм силової електроніки, базовими компонентами якого є напівпровідниковий діод, керований ключ (силовий транзистор), накопичувальний конденсатор та котушка індуктивності. Принцип функціонування топології ґрунтується на циклічному чергуванні двох фаз: У фазі накопичення енергії, коли силовими методами керування ключ S переводиться у провідний стан (замкнутий), зворотна напруга замикає діод D . У цьому інтервалі крізь індуктивність L протікає лінійно зростаючий струм i_L , що забезпечує акумулювання енергії у магнітному полі котушки. У фазі передачі енергії, при розмиканні ключа S (відсічка транзистора), струм індуктивності, в силу закону комутації, не може змінитися стрибкоподібно. ЕРС самоіндукції змінює полярність, що призводить до відпирання діода D . Струм котушки починає протікати через діод, заряджаючи фільтрувальний конденсатор C та забезпечуючи живлення навантаження R . Наприкінці комутаційного циклу струм індуктивності лінійно спадає. При цьому вихідна напруга на еквівалентному опорі навантаження R залишається згладженою, оскільки збільшення ємності конденсатора мінімізує коефіцієнт пульсацій вихідної напруги. За рахунок послідовного включення ЕРС джерела живлення та ЕРС самоіндукції котушки, амплітудне значення напруги на виході системи завжди перевищує вхідне значення. Принципову електричну схему підвищувального перетворювача наведено на рис. 2.1 [1].

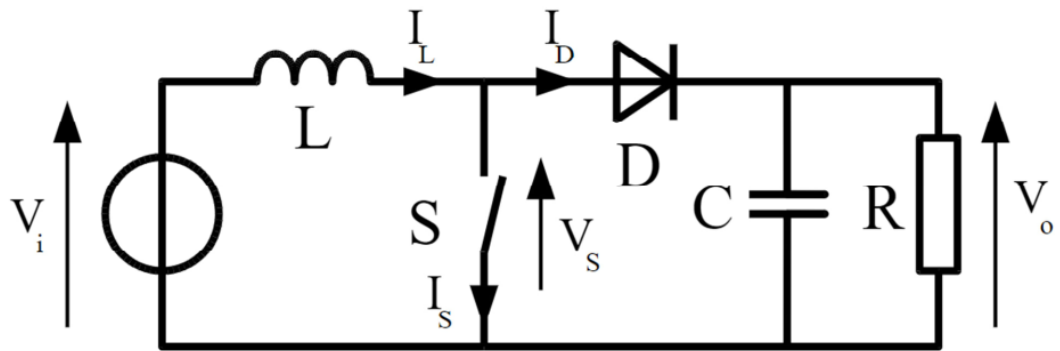


Рисунок 2.1 – Підвищувальний перетворювач

На рисунку 2.2 наведено принципову схему інвертуючого імпульсного перетворювача (buck-boost converter). Конструктивна відмінність цієї топології від підвищувального перетворювача полягає в тому, що функціональна ланка, яка складається з діода D , конденсатора C та навантаження R , підключена паралельно накопичувальному дроселю L , а не силовому транзистору S . Проте загальний фізичний принцип функціонування обох схем є подібним.

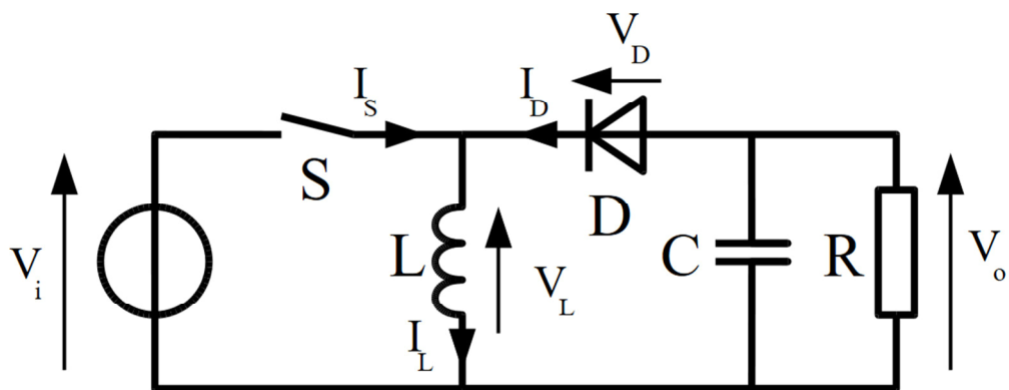


Рисунок 2.2. – Інвертуючий перетворювач

У фазі провідності, коли керований ключ S перебуває в замкненому стані, діод D зміщується у зворотному напрямку і закривається. У цей проміжок часу крізь дросель L протікає лінійно зростаючий струм, забезпечуючи накопичення енергії в його магнітному полі за рахунок джерела

живлення. Після розмикання ключа S струм індуктивності, який в силу закону комутації не може змінитися стрибкоподібно, змінює свій напрямок у контурі. Це призводить до відпирання діода D , внаслідок чого енергія, акумульована дроселем, передається у вихідний фільтрувальний конденсатор C (забезпечуючи його заряджання) та в навантаження R . До завершення комутаційного періоду струм дроселя лінійно спадає. Водночас вихідна напруга на навантаженні R залишається стабілізованою завдяки паралельно підключеному конденсатору великої ємності: величина ємності вихідного фільтра є обернено пропорційною амплітуді високочастотних пульсацій напруги. Серед ключових експлуатаційних характеристик даної топології слід виділити інверсію полярності вихідної напруги відносно вхідної. Крім того, залежно від коефіцієнта заповнення (шпаристості) імпульсів керування силовим ключем, абсолютне значення вихідної напруги перетворювача можна регулювати. Воно може бути як більшим, так і меншим за напругу первинного джерела живлення.

На рисунку 2.3 зображено схему Кука. Ця схема являє собою поєднання понижувального та підвищувального перетворювачів. Схема може змінювати вихідну напругу як у меншу, так і у більшу сторону. У схемі присутні конденсатор, транзистор, два дроселі. Коли ключ замкнутий, конденсатор здійснює передачу накопиченої енергії з входу перетворювача на вихід.

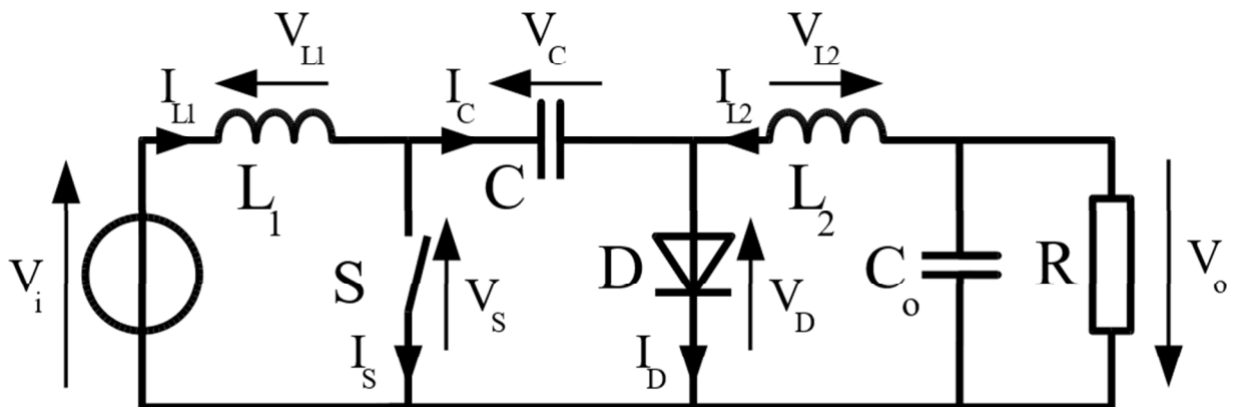


Рисунок 2.3 – Схема Кука

Наразі вкрай важливо розширювати використання джерел сонячної енергії для споживачів малої потужності (домашні, колективні та індивідуальні господарства). Основою збільшення частки відновлюваної енергетики в енергобалансі країни є впровадження подібних рішень – на основі вибору правильного поєднання доступних для певної місцевості джерел енергії та їх максимально ефективного використання. Цей вибір буде здійснюватися безпосередньо споживачем, і це стане потужним поштовхом для розвитку ринку відновлюваної енергетики [8].

Перетворювач напруги з екстремальним регулюванням (ПНЕР) застосовується в системах енергопостачання малої потужності. У даній роботі проведено дослідження перетворювача на основі підвищувальної, інверторної та схеми Кука. На рис. 2.4 представлено 2 варіанти структурної схеми ПНЕР, де джерелом енергії є сонячна батарея (СБ). Для накопичення надлишкової енергії необхідна установка зарядно-розрядного пристрою акумуляторної батареї (ЗРП АБ). Залежно від споживача встановлюється автономний інвертор (АІ) або інвертор, керований мережею (ІКМ), для перетворення постійної напруги в змінну.

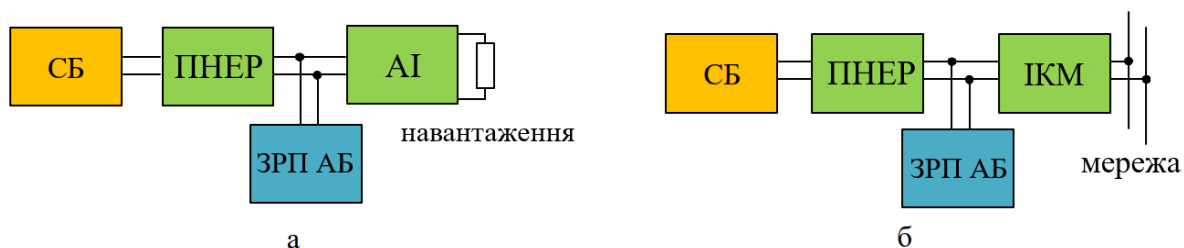


Рисунок 2.4 – Структурні схеми систем енергозабезпечення з а) автономним інвертором; та б) інвертором, що працює від мережі

У більшості випадків АІ застосовується для живлення автономних споживачів, а ІКМ — для споживачів, підключених до мережі. З огляду на ККД та вартість, встановлення цих систем є цілком доцільним як для промислових підприємств, так і для фізичних осіб [3].

Для прикладу на рисунку 2.5 представлена структурна схема ПНЕР на основі схеми Кука. Встановлюється між СБ та інвертором.

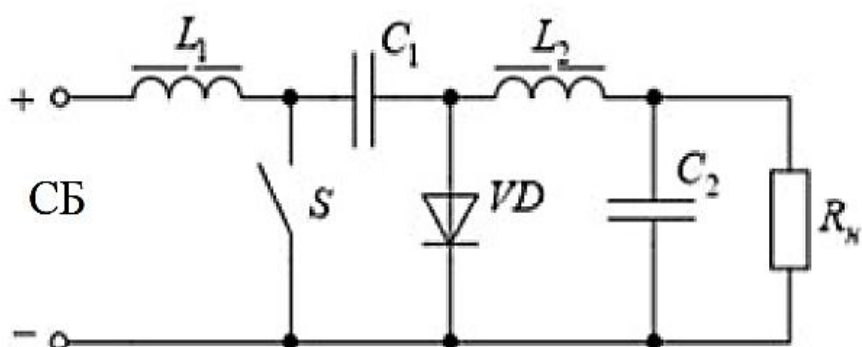


Рисунок 2.5 – Структурна схема ПНЕР на основі перетворювача Кука

Ця схема використовується для визначення максимальної потужності сонячної батареї. Для цього необхідно керувати транзистором за допомогою широтно-імпульсної модуляції.

2.2. Вибір алгоритму керування

У цій роботі розглядається один із основних способів підвищення енергетичної ефективності фотоелектричних установок. Спосіб реалізації режиму відбору максимальної потужності (екстремального регулювання) полягає у пошуку точки вольтамперної характеристики (ВАХ), яка відповідає екстремуму вольтватної характеристики (ВВХ) сонячної батареї. Через складність опису ВАХ реальної СБ тут використовується проста математична модель СБ [6]. Тут ВАХ задана трьома характерними точками: напругою холостого ходу U_{XX} , струмом короткого замикання $I_{KЗ}$, оптимальними значеннями струму I_0 і напруги U_0 :

$$I_{CB} = I_{KЗ} \left(1 - \left(1 - \frac{I_0}{I_{KЗ}} \right)^{\frac{U_{XX} - U_{CB}}{U_{XX} - U_0}} \right) \quad (2.1)$$

На рисунку 2.6 наведено приклади вольтамперних і вольтватних характеристик, побудованих за формулою (2.1)

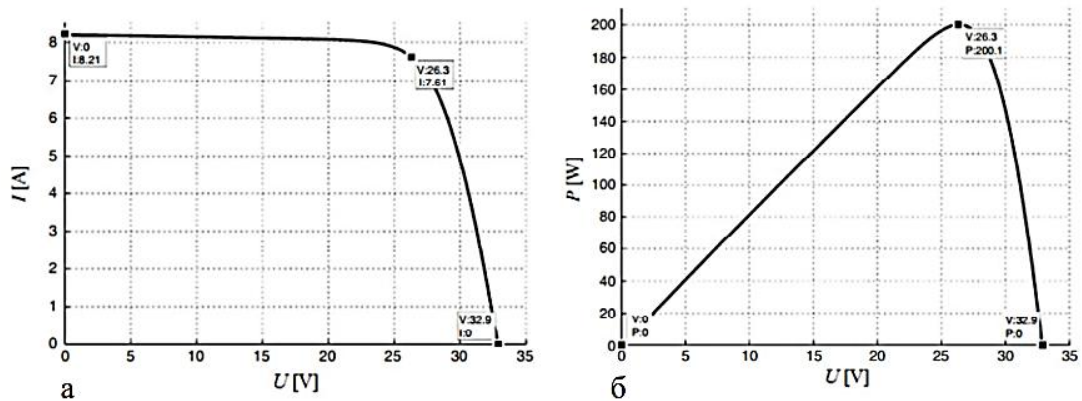


Рисунок 2.6 – Характеристики а) ВАХ та б) ВВХ сонячної панелі Kyocera KC200GT

Характеристики побудовано на основі фотоелектричної панелі Kyocera KC200GT [4].

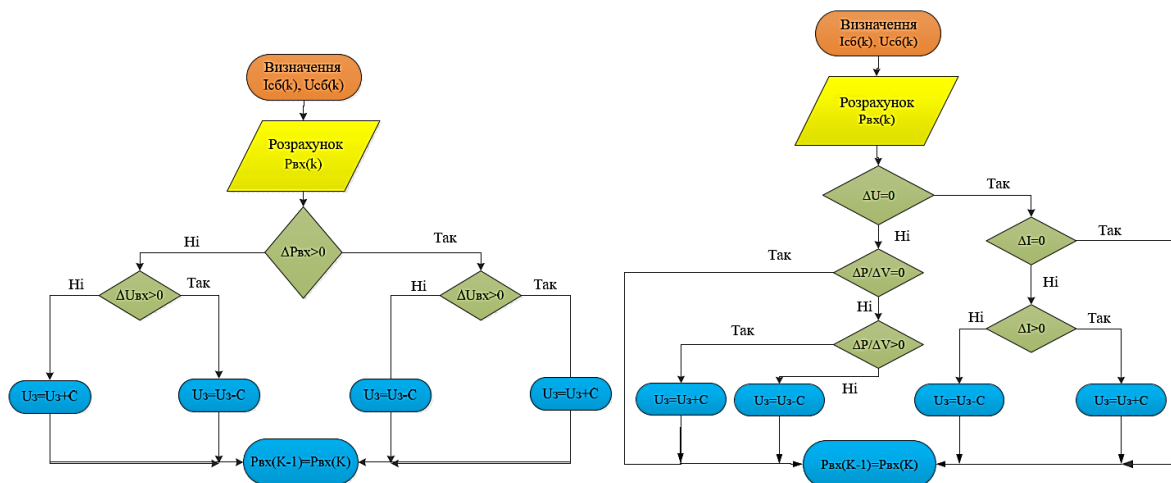


Рисунок 2.7 – Блок-схеми алгоритмів відстеження точки максимальної потужності: а) методом збурення та спостереження; б) методом зростаючої провідності

Прикладами алгоритмів для оптимізації вихідної потужності є метод збурення та спостереження (рисунок 2.7, а), метод зростаючої провідності

(рисунок 2.7, б) та метод постійної напруги [7–11]. У цій роботі використовується метод збурення та спостереження.

Функціонування алгоритму збурення та спостереження (АЗС) ґрунтується на циклічній дискретній зміні еквівалентного вхідного опору перетворювача за допомогою варіювання коефіцієнта заповнення імпульсів керування силовим ключем [10, 11]. Інкрементальний крок зміни опору зумовлює відповідну модифікацію робочої напруги на виходах сонячної батареї (СБ), після чого виконується аналітичне вимірювання та порівняння поточних параметрів генерації (рисунок 2.7, а). Якщо зафіксовано додатний градієнт потужності ($\Delta P > 0$), мікропроцесорний контролер продовжує зміну керівного впливу в аналогічному напрямку до моменту досягнення екстремуму, коли приріст потужності мінімізується або змінює знак. Завдяки низькій обчислювальній складності та простоті апаратної реалізації, цей метод набув значного поширення. Алгоритм АЗС може бути успішно інтегрований у структуру системи керування перетворювача напруги з екстремальним регулюванням, функціональну архітектуру якого представлено на рисунку 2.8.

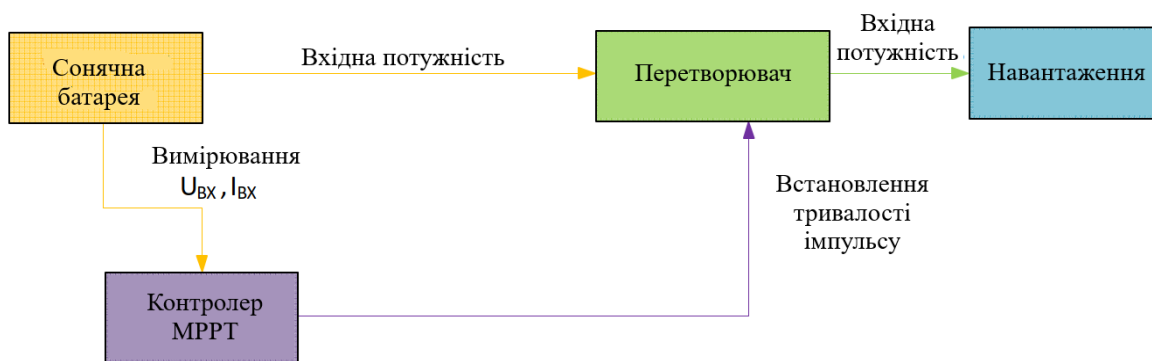


Рисунок 2.8 – Функціональна схема системи керування перетворювача напруги з екстремальним регулюванням за алгоритмом зростаючої провідності

Модифікація адаптивного АЗС передбачає динамічну зміну кроку регулювання вхідної напруги у кожному дискретному інтервалі часу. Приріст

кроку масштабується у бік зменшення, якщо зміна знака градієнта потужності свідчить про перехід через екстремальну точку (коли після зростання потужності на попередньому кроці зафіксовано її спад на поточному).

У свою чергу, алгоритм зростаючої провідності (АЗП) функціонує на основі безперервної фіксації диференціальних змін струму та напруги сонячної батареї (СБ), що дозволяє прогнозувати динаміку енергетичного відгуку системи на флуктуації напруги. Порівняно з класичним методом збурення та спостереження, алгоритм АЗП характеризується вищою обчислювальною складністю, проте забезпечує суттєво більшу швидкодію при відстеженні нестационарних змін параметрів навколишнього середовища (рівня інсоляції та температури). Разом з тим, даному підходу також притаманні автоколивання потужності в околі цільової точки.

Математичний апарат розглянутого методу базується на аналізі диференціальної (зростаючої) провідності фотоелектричного генератора для ідентифікації знака похідної потужності за напругою $\frac{\partial P}{\partial U}$. У процесі екстремального регулювання (рисунок 2.7, б) здійснюється пошук точки максимальної потужності (ТМП) шляхом порівняння зростаючої провідності $\frac{\Delta I}{\Delta U}$ із поточною статичною провідністю СБ $\frac{I}{U}$. За умови виконання критерію екстремуму $\frac{\Delta I}{\Delta U} - \frac{I}{U} = 0$ поточна вихідна напруга системи відповідає оптимальній напрузі, що забезпечує максимальний відбір потужності від фотоелектричного модуля.»

2.3. Широтно-імпульсне регулювання

Наразі в силовій електроніці, особливо в DC-DC-перетворювачах, широко поширений принцип широко-імпульсного регулювання (ШІР). Тут для формування імпульсу певної тривалості, який подається на базу транзистора для його відкриття, застосовують джерела опорної та керуючої

напруги, а також компаратор. На рисунку 2.9 представлена часова діаграма роботи ШПР, де показано, як формується необхідна тривалість імпульсу t_i .

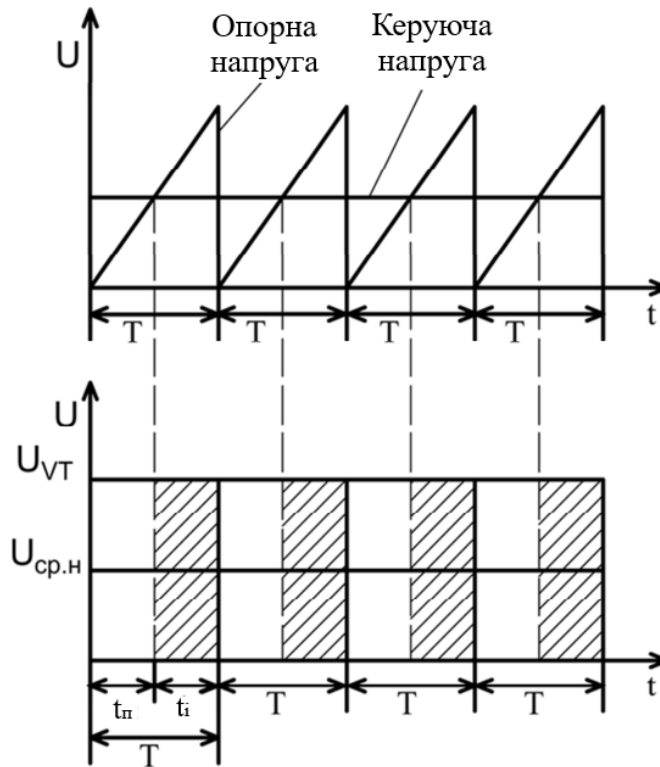


Рисунок 2.9 – Часова діаграма роботи ШПР

При реалізації цього принципу на один вхід компаратора подається пилоподібний сигнал певної частоти, який називається опорним. На другий вхід подається керуюча напруга. Потім відбувається порівняння керуючої напруги з опорною. В результаті формується імпульс відповідної тривалості на виході компаратора. Таким чином, можна змінювати значення керуючої напруги для зміни коефіцієнта заповнення, а відповідно і напругу на навантаженні. Для зниження параметрів дроселів і конденсаторів, що призводить до зниження масогабаритних показників пристрою, частоту опорного сигналу слід робити максимальною.

2.4 Розрахунок параметрів перетворювача схеми Кука

На рис. 2.10 зображено схему Кука, для якої буде проведено розрахунок параметрів.

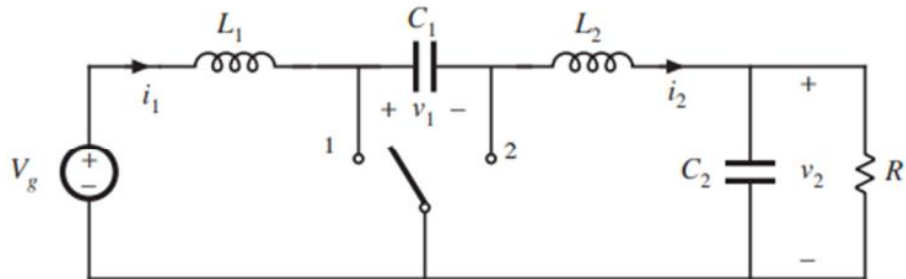


Рисунок 2.10 – Схема Кука

Цей перетворювач має два струми індуктивності на вході та виході й дві напруги на конденсаторі, які можна виразити так:

$$i_1(t) = I_1 + i_{1pulse}(t) \quad (2.2)$$

$$i_2(t) = I_2 + i_{2pulse}(t) \quad (2.3)$$

$$u_1(t) = U_1 + u_{1pulse}(t) \quad (2.4)$$

$$u_2(t) = U_2 + u_{2pulse}(t) \quad (2.5)$$

Для розрахунку перетворювача потрібно визначити I_1 , I_2 , U_1 , U_2 . Для спрощення пульсуючими складовими можна знехтувати. Для початку потрібно визначити вхідні та вихідні значення напруги, а також коефіцієнти заповнення перетворювача. Розрахунок елементів схеми проводиться за такими формулами:

$$L_1 = \frac{V_g \cdot D \cdot T_s}{2 \cdot \Delta i_1} \quad (2.6)$$

$$L_2 = \frac{V_g \cdot D \cdot T_s}{2 \cdot \Delta i_2} \quad (2.7)$$

$$C_1 = \frac{V_g \cdot D^2 \cdot T_s}{2 \cdot D' \cdot R \cdot \Delta V_1} \quad (2.8)$$

де, V_g - напруга на витоку, приймаємо рівною 24 В.

D - коефіцієнт заповнення, приймаємо рівним 0,5.

T_s - період роботи транзистора, приймаємо рівним 0,0001.

Δi_1 - приймаємо рівним 0,1 А.

ΔV_1 - приймаємо рівним 0,3 В.

R - опір навантаження, що дорівнює 100 Ом.

Далі слід підставити вибрані значення. Робота перетворювача має бути стабільною

$$L_1 = \frac{V_g \cdot D \cdot T_s}{2 \cdot \Delta i_1} = \frac{24 \cdot 0,5 \cdot 0,0001}{2 \cdot 0,1} = 6 \cdot 10^{-3}, \text{ Гн}$$

$$L_2 = \frac{V_g \cdot D \cdot T_s}{2 \cdot \Delta i_2} = \frac{24 \cdot 0,5 \cdot 0,0001}{2 \cdot 0,1} = 6 \cdot 10^{-3}, \text{ Гн}$$

$$C_1 = \frac{V_g \cdot D^2 \cdot T_s}{2 \cdot D' \cdot R \cdot \Delta V_1} = \frac{24 \cdot 0,5^2 \cdot 0,0001}{2 \cdot 0,5 \cdot 100 \cdot 0,3} = 2 \cdot 10^{-5}, \text{ Ф}$$

Для зменшення пульсацій на вході та виході перетворювача потрібно встановити на вході та виході конденсатори. Для максимально можливої швидкості роботи та мінімальних пульсацій візьмемо значення $C_2 = 3,5 \cdot 10^{-3}$ Ф, $C_3 = 1 \cdot 10^{-3}$ Ф. Потім проводиться моделювання отриманих параметрів перетворювача в MATLAB Simulink (рисунок 2.11) без зворотного зв'язку. Результати моделювання представлені на рисунку 2.12.

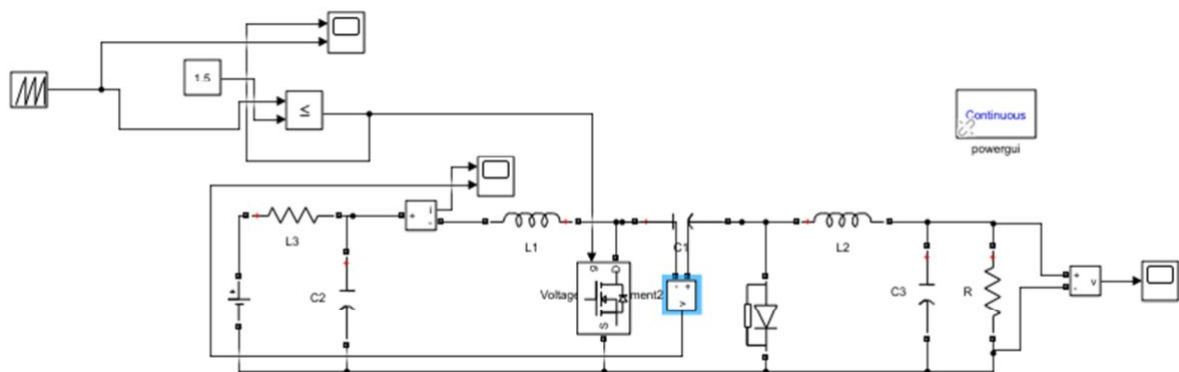
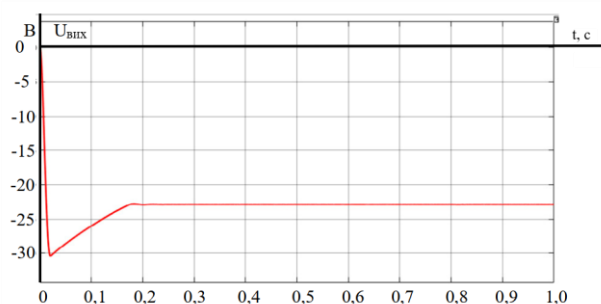
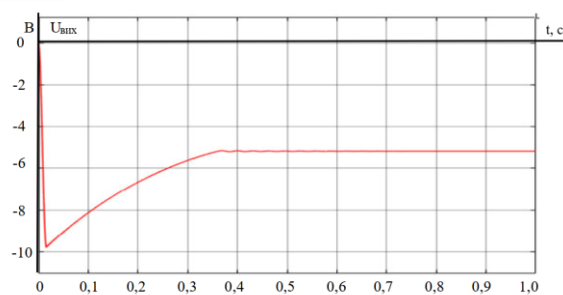


Рисунок 2.11 – Модель схеми Кука без зворотного зв'язку



а)



б)



в)

Рисунок 2.12 – Вихідна напруга перетворювача схеми Кука: а) при $D=0,5$; б) при $D=0,2$; в) при $D=0,9$

Виходячи з результатів моделювання можна побачити, що на графіках (а) та (б) спостерігається чітко виражений пік напруги на початку перехідного процесу, що свідчить про коливальний характер системи, зумовлений наявністю двох LC-фільтрів. При $D = 0,5$ - напруга стабілізується на рівні приблизно $-23...-25$ В. Спостерігається значне стартове перерегулювання (пік до -30 В) з подальшим виходом на стає значення приблизно через $0,15-0,18$ с. При $D = 0,2$ - напруга стабілізується на рівні близько $-5...-5,5$ В. Перехідний процес триває довше (близько $0,35-0,4$ с). Хоча амплітуда вихідної напруги менша, відносне перерегулювання є досить високим, що вказує на низьке демпфування системи при малих значеннях D . При $D = 0,9$ - напруга прямує до значення $-110...-120$ В. Характер процесу суттєво змінюється. Спостерігається аперіодичний перехідний процес із дуже великим часом встановлення. На інтервалі $1,0$ с напруга все ще продовжує плавно знижуватися, не досягнувши остаточного сталого стану. Це пояснюється тим,

що при високих значеннях D еквівалентний опір та енергоємність системи зростають, що уповільнює реакцію.

Ємність вихідного конденсатора $C2$ достатня для підтримки стабільної напруги без видимих пульсацій у сталому режимі. Індуктивності $L1$ та $L2$ розраховані правильно з точки зору підтримки режиму безперервних струмів, оскільки напруга не "провалюється" до нуля і не має ознак розриву струму навіть при малих коефіцієнтах заповнення ($D=0,2$).

2.4 Розрахунок підвищувального та інвертуючого перетворювача

На рисунку 2.13 зображено підвищувальний перетворювач.

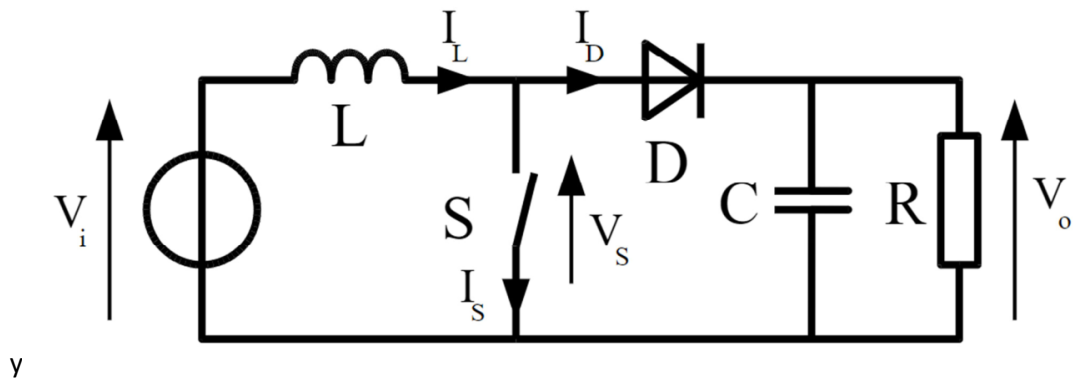


Рисунок 2.13 – Підвищувальний перетворювач

Для розрахунку перетворювача потрібно знайти відповідні значення індуктивності L та ємності C . Максимальний та мінімальний струм індуктивності на вході можна виразити так:

$$i_{\max} = i_{Lm} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.9)$$

$$i_{\min} = i_{Lm} - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.10)$$

де, i_{\max} – максимальне значення струму індуктивності.

i_{\min} – мінімальне значення струму індуктивності.

i_{Lm} – середнє значення струму індуктивності.

Якщо врахувати, що перетворювач працює в режимі переривчастих струмів $i_{\min} = 0$, то

$$\Delta i_L = 2 \cdot i_{Lm} \quad (2.11)$$

Якщо $i_{Lm} = i_{in}$, мінімальне значення індуктивності дорівнює

$$L_{\min} = \frac{V_i}{2} \cdot \frac{D}{f \cdot i_{in}} \quad (2.12)$$

$$C_{\min} = \left| \frac{\Delta V_0}{V_0} \right| \cdot \frac{D}{R \cdot f} \quad (2.13)$$

де, R – опір навантаження.

f – частота роботи перемикача.

Далі для моделювання підвищувального DC/DC-перетворювача приймаються такі параметри:

$$V = 10 \text{ В};$$

$$D = 0.5; 0.7; 0.8;$$

$$f = 20 \text{ кГц};$$

$$R = 20 \text{ Ом};$$

$$\left| \frac{\Delta V_0}{V_0} \right| = 0.1;$$

$$i_0 = 2 \text{ А};$$

$$I_n = 4 \text{ А};$$

$$L_{\min} = 31.25 \text{ мкГн};$$

$$C_{\min} = 25 \text{ мкФ};$$

Після цього проводиться моделювання отриманих параметрів перетворювача в MATLAB Simulink без зворотного зв'язку (рисунок 2.14).

Результати наведено на рисунку 2.15.

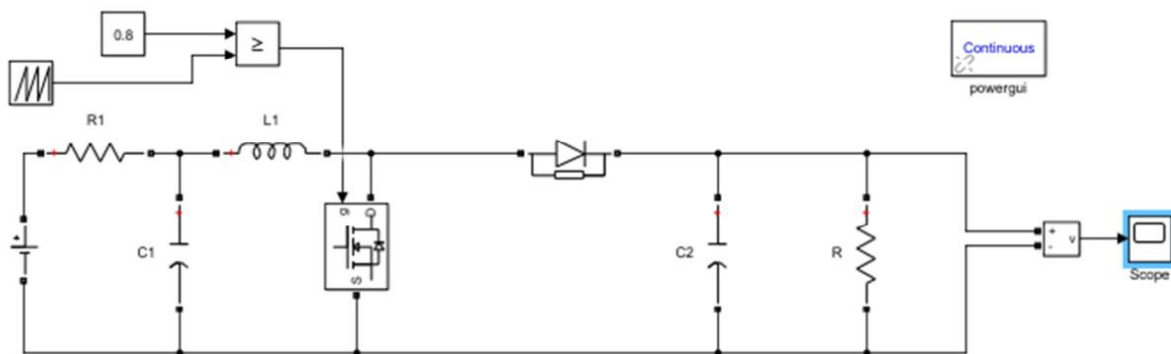
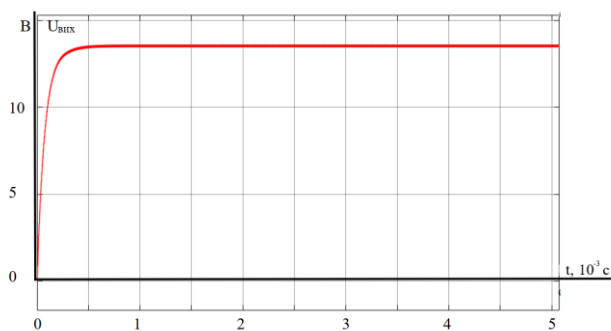
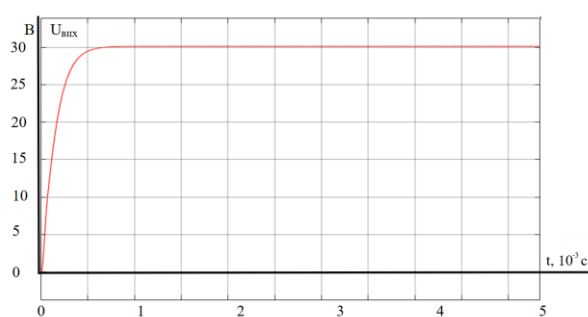


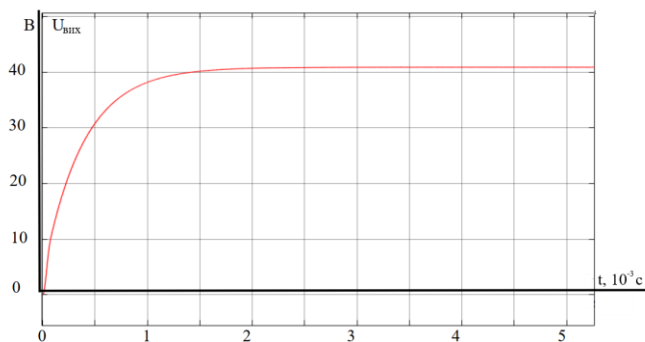
Рисунок 2.14 – Моделювання підвищувального перетворювача без зворотного зв'язку



а)



б)



в)

Рисунок 2.15 – Вихідна напруга підвищувального перетворювача: а) при $D=0,5$; б) при $D=0,7$; в) при $D=0,8$

На рисунку 2.15 показано роботу підвищувального (Boost) перетворювача, який, на відміну від попередньої схеми Кука, не інвертує напругу (вихідна напруга додатна) і має іншу математичну залежність. Процеси є аперіодичними (без коливань та перерегулювання). Це свідчить про

те, що параметри L та C обрані таким чином, що система є передемпфованою. Це ідеально для стабілізаторів напруги, де не допускаються стрибки вище номінального значення. На графіках (а) та (б) система виходить на сталий режим дуже швидко — приблизно за 0,5–0,8 мс. На графіку (в) при $D=0,8$ час встановлення збільшується до 2 мс. Вихідна напруга не має видимих пульсацій навіть при високому коефіцієнті підсилення. Це означає, що ємність вихідного конденсатора обрана з достатнім запасом для згладжування імпульсів струму.

На рисунку 2.16 показано Simulink модель інвертуючого перетворювача.

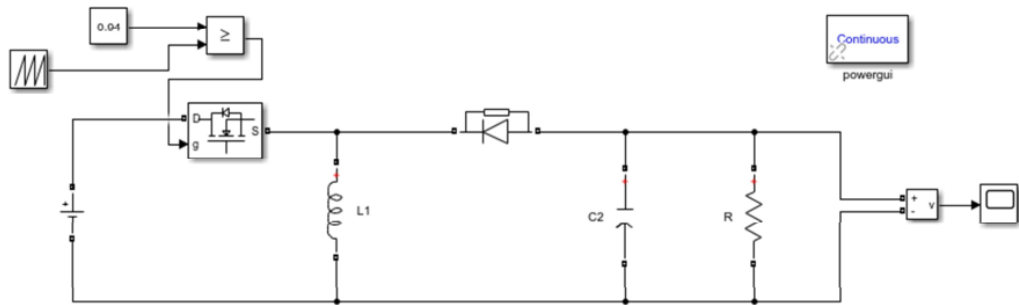


Рисунок 2.16 – Моделювання інвертуючого перетворювача без зворотного зв'язку.

На рисунку 2.16 представлена імітаційна модель інвертуючого перетворювача в середовищі MATLAB Simulink. Модель побудована за класичною топологією Buck-Boost із використанням бібліотеки Simscape Electrical. Система керування реалізована на базі генератора пилоподібної напруги та релейного елемента, що дозволяє досліджувати статичні та динамічні характеристики перетворювача при фіксованих значеннях коефіцієнта заповнення D . Дана модель використовується як еталонна для порівняльного аналізу ефективності схеми Кука та дослідження точності алгоритмів МРРТ.

Результати моделювання показано на рисунку 2.17.

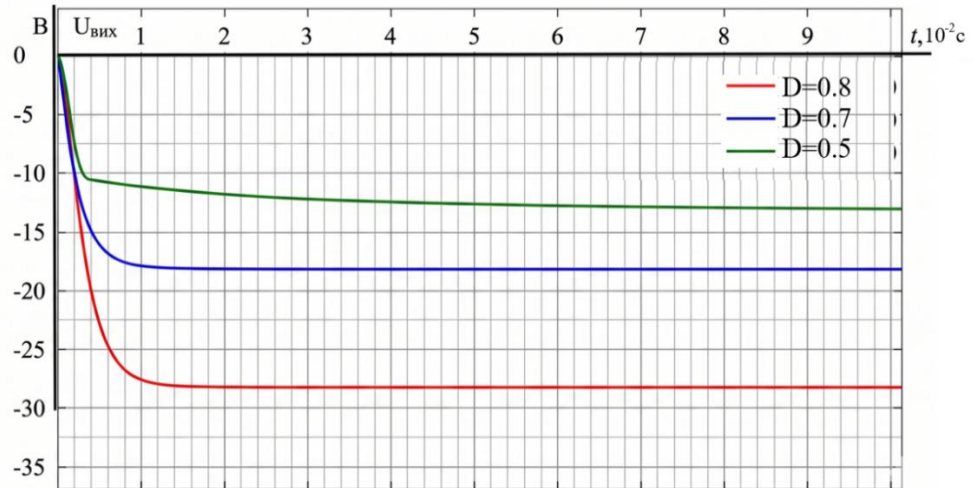


Рисунок 2.17 – Вихідна напруга перетворювача при $D=0,5$, $D=0,7$, $D=0,8$

З отриманих графіків видно, що вихідна напруга перетворювача набуває постійного значення, що свідчить про правильність методу розрахунку елементів схеми.

Висновки до розділу

1. Проведено порівняльний аналіз топологій імпульсних перетворювачів постійної напруги. Визначено, що на відміну від класичного підвищувального конвертора, інвертуючого перетворювач та схема Кука забезпечують ширший діапазон регулювання вихідної напруги (як у бік збільшення, так і в бік зменшення відносно вхідної), що є критично важливим для гнучкого узгодження динамічних ВАХ сонячних батарей із проміжною ланкою постійного струму інверторів.

2. Здійснено розрахунок номіналів елементів перетворювачів, та проведено моделювання їх роботи для трьох значень коефіцієнта заповнення. Показано, що вихідна напруга досить швидко набуває постійного значення, що свідчить про правильність проведених розрахунків

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Моделювання режимів освітленості сонячної батареї

В роботі проведено моделювання систем відстеження точки максимальної потужності з підвищувальним, інвертуючим та перетворювачем Кука. На базі моделей здійснюється програмування адаптивного алгоритму збурення та спостереження екстремального регулювання (рисунок 2.7). Це дозволить отримати дані, що більше наближені до показників реальної системи. Мета моделювання - порівняти показники роботи всіх трьох схем і визначити найбільш прийнятний варіант. Для цього моделювання буде проводитися з однаковими початковими умовами, а саме зі зміною рівня освітленості.

На рисунку 3.1 показано значення освітленості, що змінюються у часі. Досліджуваний об'єкт працює за заданими початковими умовами, щоб продемонструвати, як поводить система за різних рівнів освітленості.

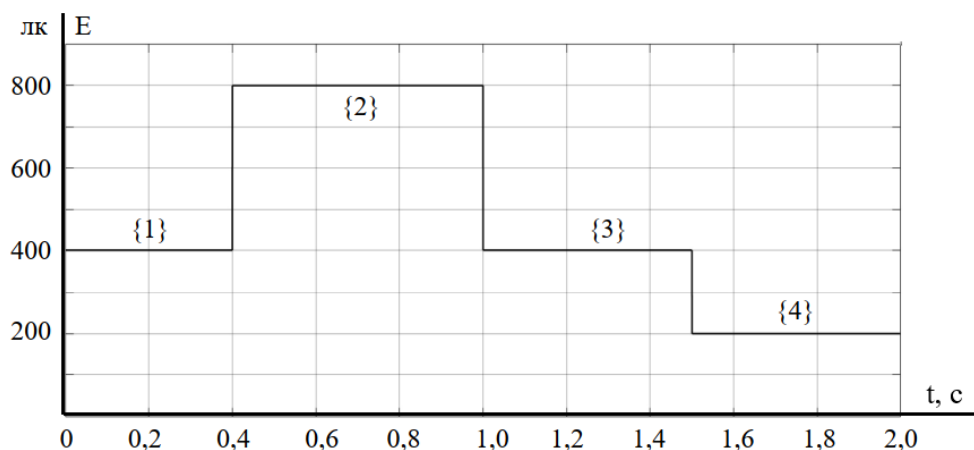


Рисунок 3.1 – Режими освітленості СБ

Для моделювання використовується модель СБ, розрахована за виразом (1) для фотоелектричної панелі Kyocera KC200GT (рисунок 2.6). У результаті отримано теоретичні ВАХ і ВВХ моделі, наведені на рисунку 3.2. Режим освітленості, позначений на рисунку 3.1 цифрою {1} з освітленістю 400 лк, має потужність близько 700 Вт, режим {2} з освітленістю 800 лк має

потужність близько 1100 Вт. Режим {3}, так само як і режим {1}, має освітленість 400 лк і потужність 700 Вт. Четвертий режим {4} відповідає 200 лк і потужності 400 Вт.

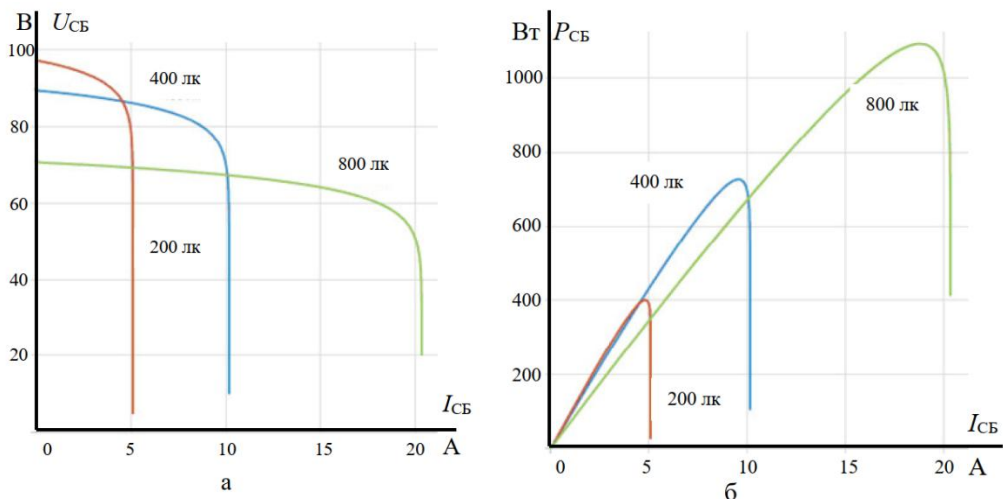


Рисунок 3.2 – Характеристики моделі СБ Kyocera KC200GT: а) ВАХ; б) ВВХ

3.2. Моделювання роботи перетворювача напруги з екстремальним регулюванням зі схемою Кука

На цьому етапі дослідження реалізовано комп'ютерне моделювання топології перетворювача Кука під керуванням адаптивного алгоритму збурення та спостереження. На рисунку 3.3 представлено розроблену імітаційну модель системи пошуку точки максимальної потужності (ТМП) на базі конвертора Кука. Структурно модель інтегрує два основні функціональні блоки: силовий контур, що взаємодіє з модулем завдання нестационарних режимів інсоляції, та систему автоматичного керування, яка реалізує алгоритми екстремального регулювання.

У силовій частині рисунок 3.3а, наведено силовий ланцюг перетворювача Кука, який включає фотоелектричний модуль, комутаційний ключ, діоди, індуктивності, конденсатори та активне навантаження. Для аналізу роботи системи в різних умовах експлуатації передбачено блок

перемикання режимів освітлення, що дозволяє змінювати рівень сонячної радіації та моделювати динамічні зміни зовнішніх умов. У схемі реалізовано вимірювання входної напруги та струму фотоелектричного модуля, необхідних для визначення поточної потужності та функціонування МРРТ-алгоритму.

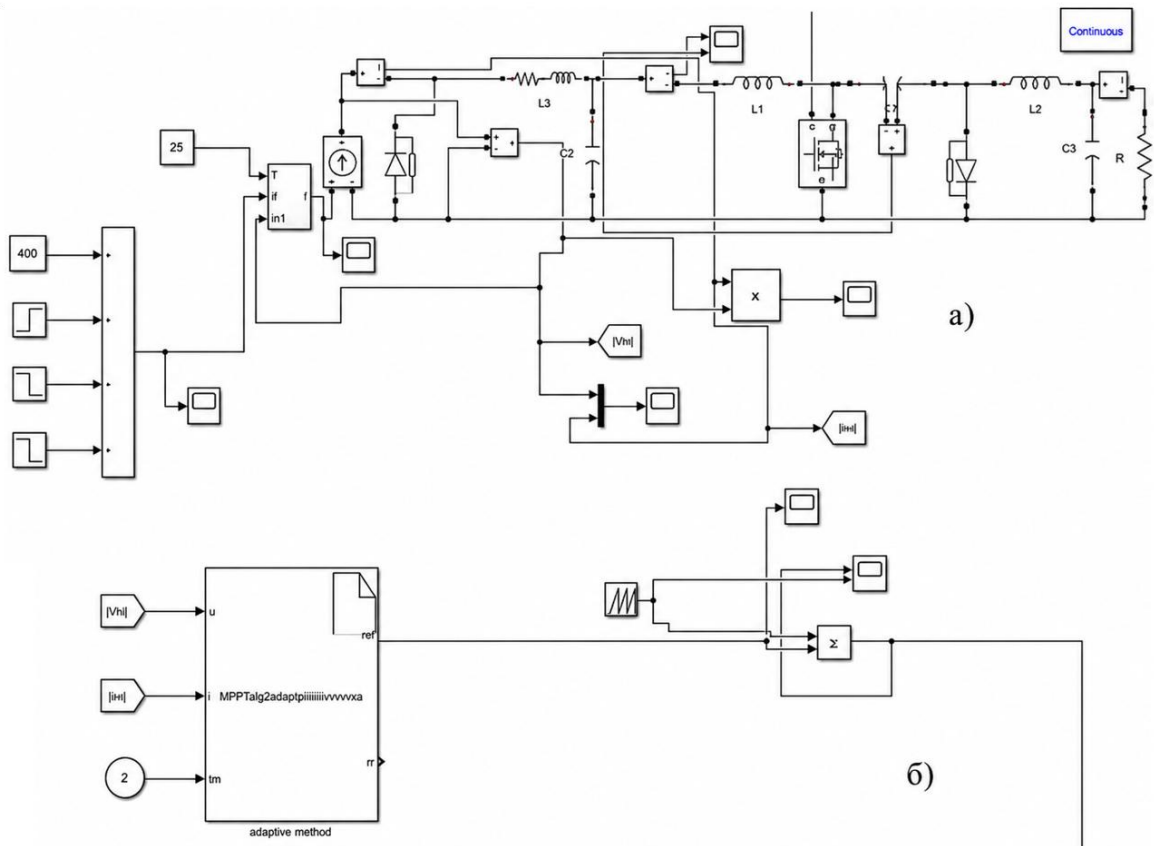


Рисунок 3.3 – Імітаційна модель дослідження алгоритмів МРРТ зі схемою Кука: а) силовий ланцюг і блок перемикання режимів освітлення; б) система керування з алгоритмами екстремального регулювання

У частині системи керування (рисунок 3.3б), показано систему керування, яка реалізує алгоритми екстремального регулювання для пошуку точки максимальної потужності. Сигнали напруги та струму формують керуючий вплив, що визначає коефіцієнт заповнення імпульсів керування силовим ключем перетворювача. Система керування забезпечує автоматичне

відстеження оптимального режиму роботи фотоелектричного модуля при зміні рівня освітлення та параметрів навантаження. Розроблена імітаційна модель забезпечує можливість комплексного оцінювання динамічних характеристик системи, визначення показників швидкодії алгоритмів МРРТ, а також аналізу ефективності конвертування електричної енергії за умов варіювання режимів експлуатації.

У результаті імітаційного моделювання моделі зі схемою Кука отримано графіки виходу на робочу точку ВАХ та визначено точки максимальної потужності ВВХ при зміні величини освітленості сонячної панелі. На наведених часових діаграмах струму, напруги (рисунок 3.4) та потужності (рисунок 3.5) для адаптивного алгоритму збурення та спостереження видно, як крок керування на вхідну напругу зменшується.

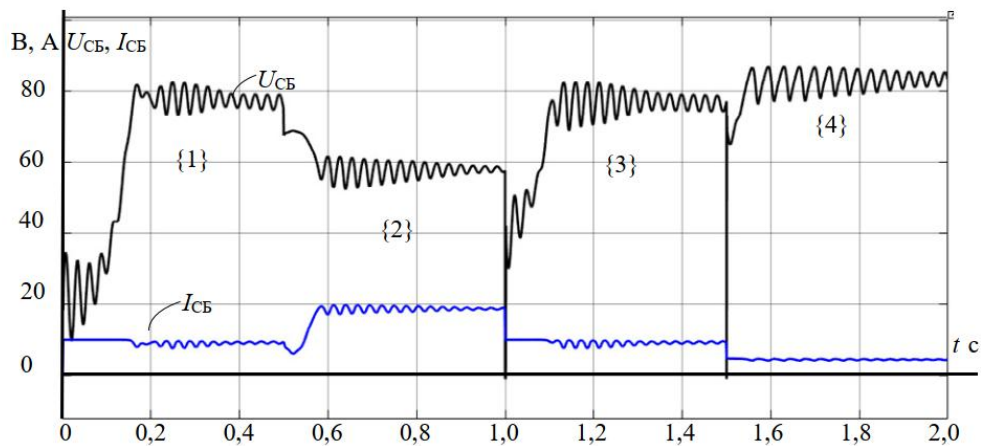


Рисунок 3.4 – Діаграми струму та напруги СБ, отримані під час моделювання за схемою Кука

На рисунку 3.4 наведено часові діаграми напруги U_{CB} та струму I_{CB} сонячної батареї, отримані в результаті моделювання роботи фотоелектричної системи зі схемою перетворювача Кука. Аналіз графіків показує реакцію системи на зміну рівня освітленості та підтверджує працездатність алгоритму відстеження точки максимальної потужності. На початковому етапі роботи спостерігається перехідний процес, під час якого напруга та струм виходять

на усталені значення. Подальші зміни параметрів у моменти часу, що відповідають ділянкам {1}–{4}, обумовлені зміною режимів освітлення фотоелектричного модуля. При цьому система керування забезпечує автоматичне переналаштування режиму роботи перетворювача та стабілізацію параметрів із незначними коливаннями навколо нового робочого значення.

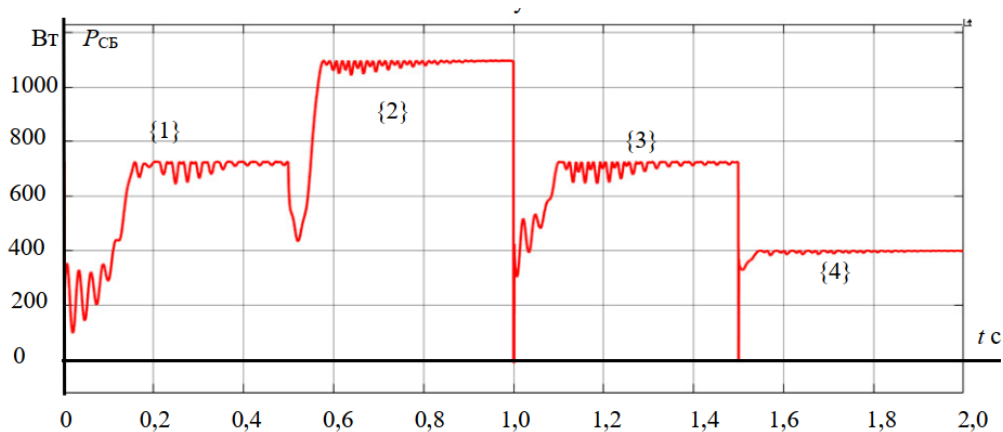


Рисунок 3.5 – Діаграма потужності СБ, отримана під час моделювання за схемою Кука

На рисунку 3.5 представлено часову діаграму вихідної потужності фотоелектричної батареї P_{CB} у визначених режимах експлуатації. Графічний аналіз отриманих залежностей свідчить, що за будь-яких дискретних змін інтенсивності інсоляції алгоритм МРРТ успішно ідентифікує нові координати точки максимальної потужності, забезпечуючи перехід системи на відповідний квазістаціонарний рівень генерації. Короткочасні перехідні процеси супроводжуються автоколиваннями потужності з високим демпфуванням, завдяки чому система за мінімальний час досягає стабільного статичного режиму. Верифіковані результати комп'ютерного експерименту підтверджують високу ефективність функціонування алгоритму екстремального регулювання та здатність системи утримувати робочу точку фотоелектричного генератора в околі ТМП за умов динамічної зміни збурювальних зовнішніх чинників. Крім того, зафіксовано збіжність

траєкторії виходу системи на робочий режим із теоретичними характеристиками, розрахованими аналітичним шляхом (рис. 3.2). Досліджуваний алгоритм характеризується низьким коефіцієнтом високочастотних пульсацій у поєднанні з високою швидкістю досягнення екстремуму.

3.3. Моделювання роботи перетворювача напруги з екстремальним регулюванням з підвищувальним перетворювачем

На рисунку 3.6 представлена детальна структурна схема імітаційної моделі цифрової системи екстремального регулювання, призначеної для автоматичного відстеження точки максимальної потужності (ТМП) фотоелектричної батареї на базі підвищувального перетворювача.

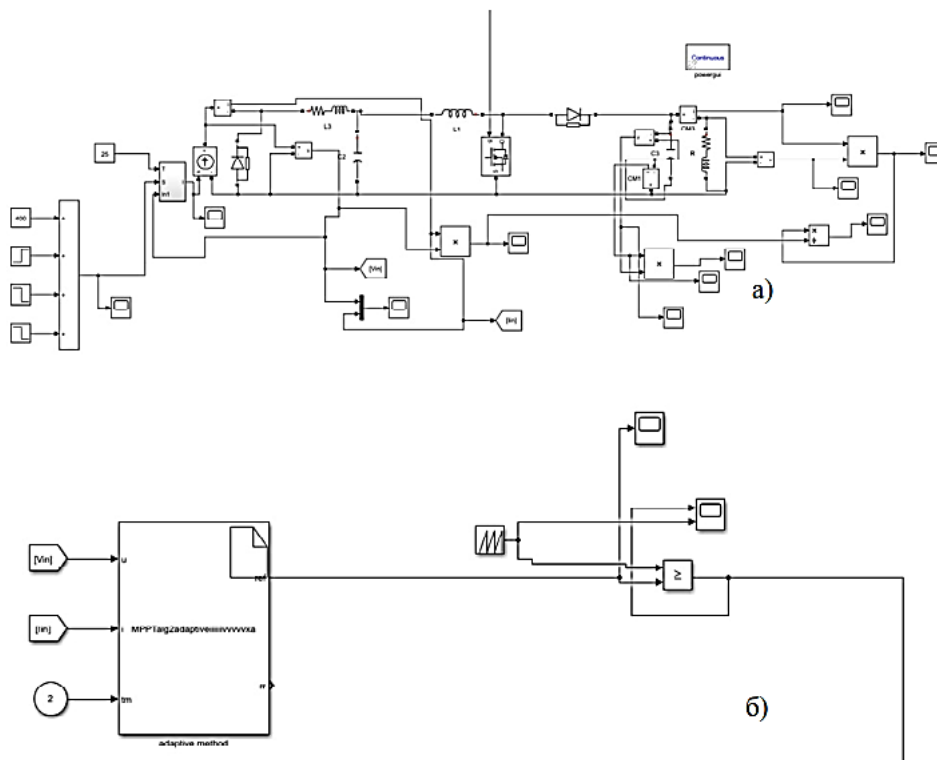


Рисунок 3.6 – Імітаційна модель для дослідження алгоритмів МРРТ з підвищувальним перетворювачем: а) силовий ланцюг і блок перемикання режимів освітлення; б) система керування з алгоритмами екстремального регулювання

Тут, на відміну від попередньої схеми, спостерігаються значні пульсації як напруги та і потужності протягом усього проміжку часу зміни освітленості. На наведених часових діаграмах струму, напруги (рисунок 3.7) та потужності (рисунок 3.8) для адаптивного алгоритму збурення та спостереження видно, як крок задавання на вхідну напругу хоч і зменшується, але все одно пульсації залишаються великими.

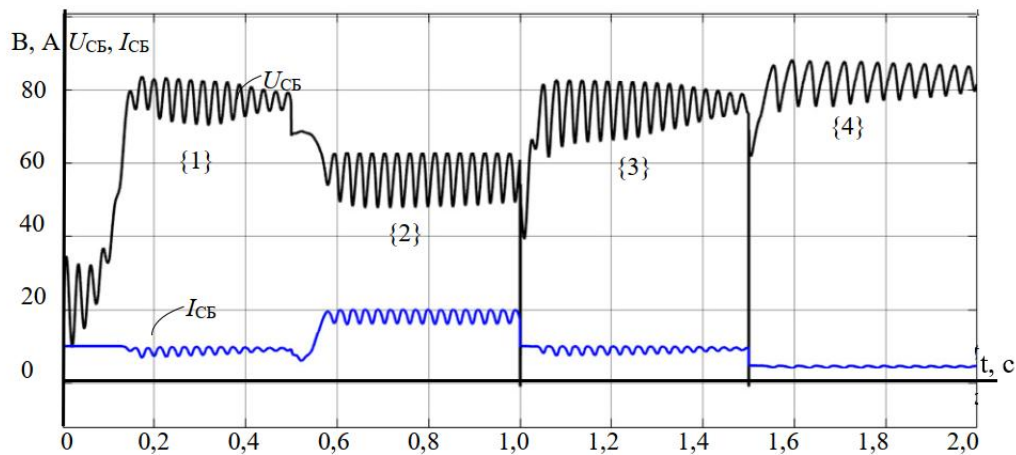


Рисунок 3.7 – Діаграми струму та напруги СБ, отримані під час моделювання з підвищувальним перетворювачем

У порівнянні з результатами моделювання для схеми Кука, у системі з підвищувальним перетворювачем спостерігаються більші пульсації напруги та струму сонячної батареї, особливо в режимах зі знизеним рівнем освітлення. Перехідні процеси мають більш виражений коливальний характер, а стабілізація параметрів відбувається повільніше. Це пояснюється особливостями роботи підвищувального перетворювача, в якому енергетичний обмін супроводжується вищим рівнем пульсацій струму на вході.

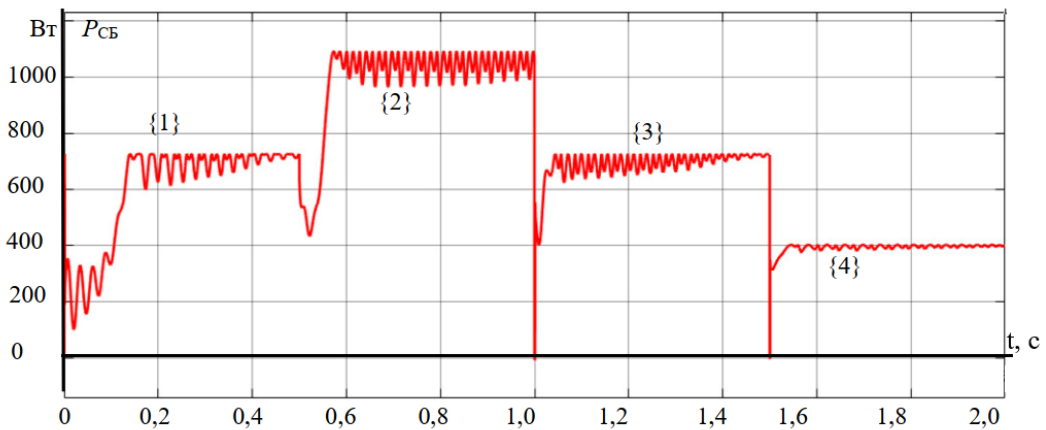


Рисунок 3.8 – Діаграма потужності СБ, отримана під час моделювання з підвищувальним перетворювачем

Відповідно до характеристик показаних на рисунку тут також здійснюється вихід на робочу точку, але з більшими коливаннями значення потужності СБ.

На рисунку 3.8 наведено часову діаграму потужності сонячної батареї $P_{СБ}$, яка відображає реакцію системи на ступінчасту зміну рівня інсоляції на ділянках {1}–{4}. Аналіз графіка підтверджує працездатність алгоритму екстремального регулювання: після кожного перепаду освітленості система успішно знаходить новий рівень максимальної потужності.

У секторі {2} система досягає пікової потужності близько 1100 Вт, що свідчить про повну реалізацію потенціалу сонячної панелі при високому рівні інсоляції.

На початкових етапах перехідних процесів (моменти 0,5 с, 1,0 с, 1,5 с) спостерігаються короткочасні коливання, після чого потужність виходить на сталий рівень.

На даній діаграмі в порівнянні з рисунком 3.5 спостерігається значно вища амплітуда коливань потужності в усталених режимах, особливо на ділянці {2}. Це вказує на те, що вхідний струм у Boost-топології є переривчастим або має вищий рівень гармонік, що змушує алгоритм МРРТ постійно здійснювати ширші "кроки" пошуку навколо точки максимуму.

Хоча підвищувальний перетворювач швидше виходить на робочий режим, якість стабілізації потужності є нижчою. У схемі Кука за рахунок додаткової індуктивності на вході ці пульсації були значно краще демпфовані.

В обох випадках алгоритм МРРТ справляється зі своїм завданням, проте у системі з перетворювачем Кука робоча точка утримується ближче до теоретичного максимуму з меншим відхиленням.

3.4. Моделювання роботи перетворювача напруги з екстремальним регулюванням з інверторним перетворювачем

У цьому підрозділі виконано комп'ютерне моделювання силового перетворювального каскаду, робота якого оптимізується за допомогою адаптивного цифрового алгоритму збурення та спостереження. На рисунку 3.9 представлена розроблена імітаційна модель замкненої системи автоматичного відстеження точки максимальної потужності (ТМП).

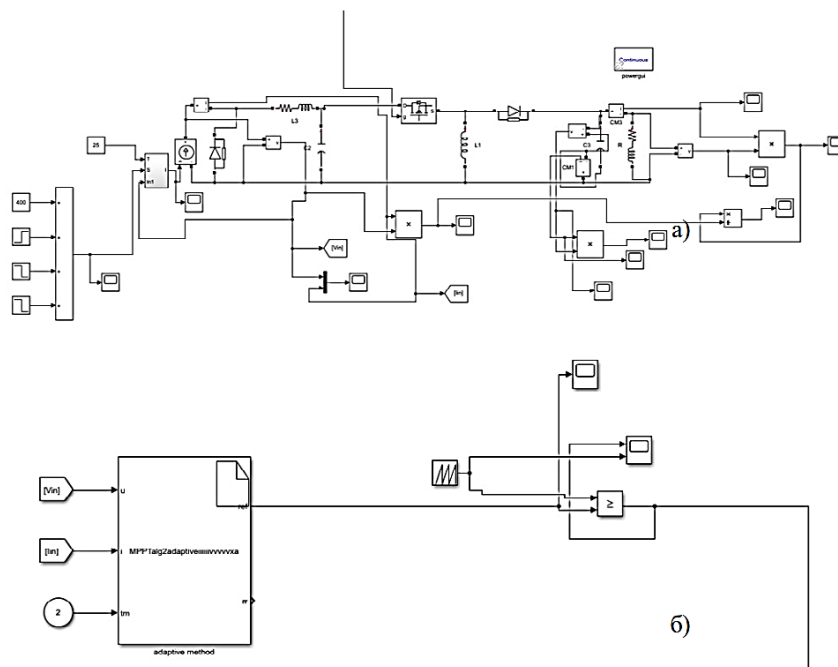


Рисунок 3.9 – Імітаційна модель для налагодження алгоритмів МРРТ з інверторним перетворювачем: а) силовий ланцюг і блок перемикання режимів освітлення; б) система керування з алгоритмами екстремального регулювання

У результаті моделювання перетворювача екстремального регулювання на основі інверторного перетворювача отримано графік виходу на робочу точку. З наведених часових діаграмах струму, напруги (рисунок 3.10) та потужності (рисунок 3.11), отриманих під час моделювання, видно, що пульсації порівняно з підвищувальним перетворювачем помітно менші, але все-таки трохи більші, ніж у схемі Кука. Як і з попередніми схемами, тут також здійснюється вихід на робочу точку, відповідно до характеристик, отриманих математично.

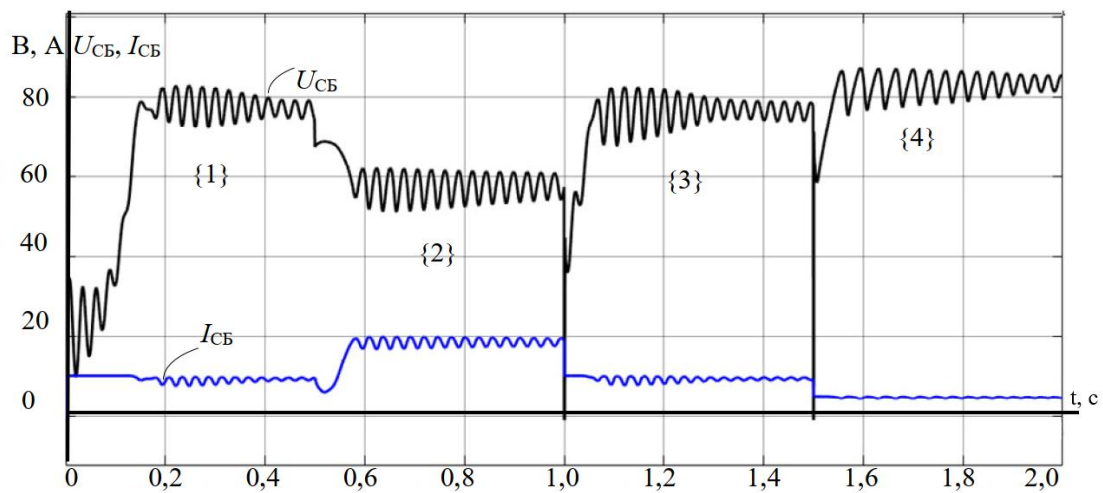


Рисунок 3.10 – Діаграми струму та напруги СБ, отримані під час моделювання інверторного перетворювача

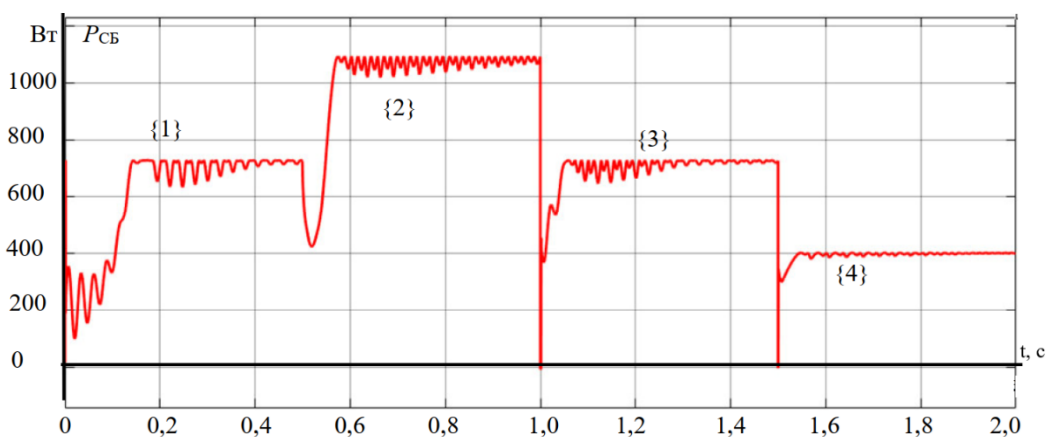


Рисунок 3.11 – Діаграма потужності СБ, отримана під час моделювання інвертуючого перетворювача

Для порівняння проведено розрахунок коефіцієнтів пульсації за напругою (k_{nu}) та за потужністю (k_{np}) для досліджуваних перетворювачів за наведеними нижче формулами.

$$k_{np} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}}; \quad (3.1)$$

$$k_{nu} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}}. \quad (3.2)$$

У таблиці 3.1 наведено значення коефіцієнтів пульсації за потужністю (k_{np}) та за напругою (k_{nu}) для адаптивного та неадаптивного алгоритмів, розраховані за виразами (3.1) та (3.2).

Таблиця 3.1 Коефіцієнт пульсації потужності та напруги

Інтервал освітленості	Схема Кука		Підсилюючий перетворювач		Інвертуючий перетворювач	
	k_{np}	k_{nu}	k_{np}	k_{nu}	k_{np}	k_{nu}
1	0,0097	0,029	0,01	0,03	0,01	0,029
2	0,0013	0,017	0,049	0,123	0,0092	0,061
3	0,0076	0,032	0,009	0,04	0,0072	0,032
4	0,0037	0,024	0,0086	0,0390,01	0,0072	0,025

Найбільш показовим є порівняння на інтервалі {2}, який відповідає режиму максимальної потужності генерації. Коефіцієнт пульсації напруги k_{nu} у підсилювальному перетворювачі сягає 0,123, тоді як у схемі Кука становить лише 0,017. Це означає, що схема Кука забезпечує у 7,2 рази кращу стабільність напруги при високих струмах. Коефіцієнт пульсації потужності k_{np} для схеми Кука - мінімальний (0,0013), що свідчить про майже ідеальне згладжування енергетичного потоку, тоді як у підсилювального перетворювача пульсації потужності у 37 разів вищі (0,049).

Інвертуючий перетворювач демонструє проміжні результати. Хоча він працює стабільніше за підсилювальний у деяких режимах (наприклад, інтервал {3}), він суттєво поступається схемі Кука за рівнем пульсацій на виході. Зокрема, на інтервалі {2} його $k_{\text{пу}}$ (0,061) у 3,5 рази перевищує аналогічний показник схеми Кука.

Отримані дані підтверджують, що наявність індуктивностей як на вході, так і на виході перетворювача Кука дозволяє досягти найменших значень пульсацій у всьому діапазоні робочих режимів.

Схема Кука виявляє найвищу стабільність саме при максимальному навантаженні (інтервал {2}), де інші топології демонструють різке зростання коефіцієнтів пульсації. Це важливо для точності роботи алгоритму MPPT, оскільки низький рівень "шуму" в параметрах дозволяє контролеру чіткіше утримувати точку максимальної потужності.

Мінімальні значення $k_{\text{пр}}$ свідчать про те, що сонячна батарея працює в найбільш сприятливому режимі з точки зору довговічності та ККД, оскільки виключаються значні амплітудні коливання струму, що викликають додаткові теплові втрати

Для кожного з розглянутих перетворювачів було також проведено розрахунок точності визначення локального екстремуму ВВХ у робочій точці за таким законом:

$$\nu = \frac{P'_{\text{max}}}{P_{\text{max}}} \quad (3.3)$$

де, P'_{max} - реально отримана потужність, P_{max} - теоретично можливий максимум потужності.

Результати розрахунків наведено в таблиці 3.2.

З результатів представлених у таблиці видно що, схема Кука демонструє найвищу точність серед усіх розглянутих топологій на всіх інтервалах освітленості: Значення коефіцієнта ν стабільно перевищують 0,98, досягаючи максимуму 0,9975 на четвертому інтервалі. Навіть у режимі максимальної генерації (інтервал {2}), де навантаження на систему є найвищим, точність

становить 0,99. Це свідчить про те, що алгоритм МРРТ працює майже ідеально, втрачаючи лише 1% енергії на ітераційний пошук.

Таблиця 3.2. – Точність визначення точки максимальної потужності

Інтервал освітленості	Схема Кука	Підсилюючий перетворювач	Інвертуючий перетворювач
1	0,98	0,9756	0,967
2	0,99	0,9818	0,963
3	0,992	0,976	0,966
4	0,9975	0,977	0,99

Підсилюючий перетворювач показує помітно нижчу точність (у межах 0,975–0,98). Це пояснюється результатами попереднього аналізу (табл. 3.1): вищий рівень пульсацій створює «шум» у вхідних параметрах, що змушує алгоритм МРРТ частіше помилятися або здійснювати ширші коливання навколо точки максимуму.

Інвертуючий перетворювач має найнижчі показники на інтервалах з високою інсоляцією (наприклад, 0,963 на інтервалі {2}). Це означає втрату майже 4% енергії панелі лише через нестабільність роботи перетворювача.

3.5 Порівняння роботи адаптивного та неадаптивного алгоритму роботи збурення в схемі Кука

Для порівняння адаптивного та неадаптивного алгоритмів збурення та спостереження було проведено моделювання схеми Кука, оскільки вона продемонструвала найкращі результати порівняно з підсилювальним та інверторним перетворювачем. Проаналізувавши діаграми струму ($I_{ВХ}$) та напруги ($U_{ВХ}$) на рисунок 3.12, а також на рисунок 3.14 – потужності ($P_{СБ}$), можна зробити висновок, що необхідного рівня максимальної потужності

перетворювач досягає досить швидко, але, з іншого боку, пульсації перевищують норму.

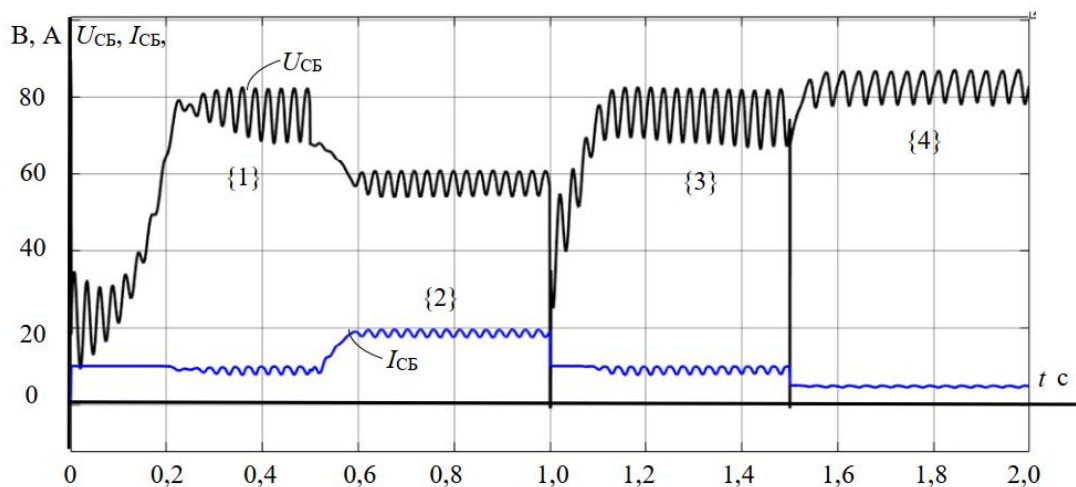


Рисунок 3.12 – Діаграми струму та напруги СБ для неадаптивного алгоритму збурення та спостереження зі схемою Кука

Оскільки алгоритм є неадаптивним, він використовує незмінну величину приросту коефіцієнта заповнення $D = const$. Це призводить до того, що навіть після досягнення точки максимальної потужності, система не може «стабілізуватися» і продовжує здійснювати циклічні кроки навколо екстремуму.

На графіку напруги (рисунок 3.12) чітко видно "зубчасту" структуру. При високій інсоляції (сектор {2}) розмах цих коливань стає найбільш помітним, що створює додаткове динамічне навантаження на реактивні елементи перетворювача Кука.

На відміну від адаптивних систем, де амплітуда кроку зменшується при наближенні до максимуму, тут ми бачимо безперервні коливання потужності особливо на ділянках {1}, {2} та {3} (рисунок 3.13). Це призводить до того, що середня потужність, яка віддається в навантаження, завжди трохи нижча за теоретично можливий максимум.

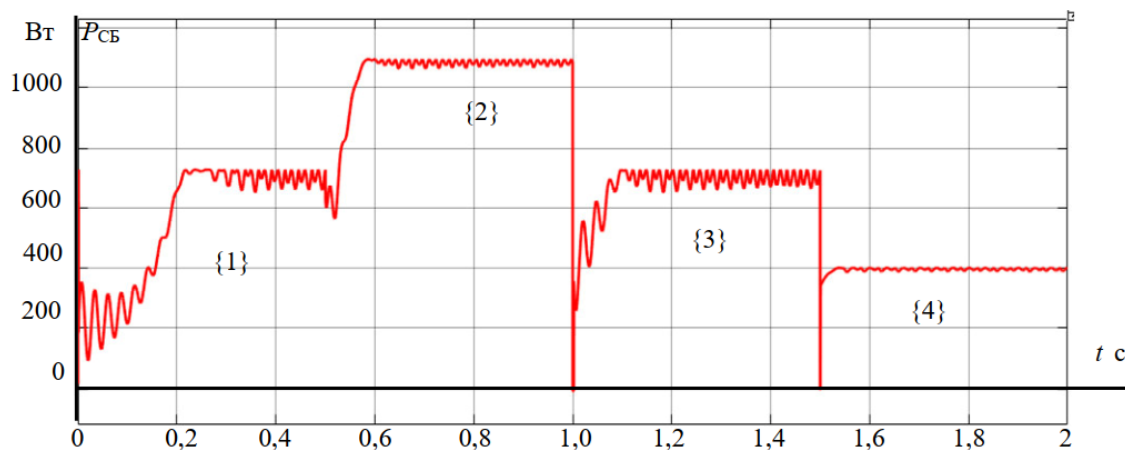


Рисунок 3.13 – Діаграма потужності СБ для неадаптивного алгоритму збурення та спостереження зі схемою Кука

Продовжуючи працювати з адаптивним алгоритмом збурення та спостереження, було отримано часові діаграми потужності (рисунок 3.14), напруги (рисунок 3.15) та струму (рисунок 3.16) на виході схеми Кука. Для цього в якості навантаження було взято опір $R_{\text{вих}}=100 \text{ Ом}$ і $L_{\text{вих}}=1 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$. Як видно з даних діаграм, потужність разом з напругою та струмом зменшилася при збільшенні освітленості з 400 лк до 800 лк. Це пов'язано з тим, що даний перетворювач має обмежене значення підвищеної напруги.

Висновки до розділу

1. Розроблено та верифіковано в середовищі комп'ютерного моделювання імітаційні моделі систем МРРТ на базі підвищувального перетворювача та конвертора Кука. Результати моделювання підтвердили високу адекватність розробленого програмно-модельного комплексу та продемонстрували високу швидкість адаптації системи до динамічних змін рівнів інсоляції, низький коефіцієнт високочастотних пульсацій напруги та точний збіг траєкторій виходу на стаціонарний режим із попередньо розрахованими теоретичними характеристиками.

2. Отримані результати комплексного моделювання підтверджують, що використання перетворювача Кука у поєднанні з алгоритмом МРРТ

дозволяє підтримувати роботу сонячної батареї з максимально можливим ККД у широкому діапазоні змін зовнішнього середовища. Система виявляє високу завадостійкість та швидко збіжність алгоритму до точки максимальної потужності.

3. Отримані дані свідчать про те, що хоча підвищувальний перетворювач забезпечує необхідне підсилення напруги та реалізує алгоритм МРРТ, він створює значне імпульсне навантаження на сонячну батарею. Для високоточних систем, де важливо мінімізувати деградацію фотоелектричних комірок та забезпечити максимально плавне знімання енергії, перевагу варто віддати схемі Кука, результати моделювання якої демонструють кращі показники згладжування.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Дія електричного струму на організм людини

Аналіз нещасних випадків в промисловості, свідчить про те, що кількість травм, викликаних дією електрики, порівняно невелика і складає 0,5–1% від загальної кількості нещасних випадків. Проте з загальної кількості нещасних випадків зі смертельним наслідком на виробництві 20–40% трапляється внаслідок ураженням електрострумом, що більше, ніж в наслідок дії інших причин, причому близько 80% смертельних уражень електричним струмом відбувається в електроустановках напругою до 1000 В.

Проходячи через тіло людини, електричний струм справляє термічну, електролітичну, механічну та біологічну дію.

Електролітична дія струму характеризується розкладом органічної рідини, в тому числі і крові, що супроводжується значними порушеннями їх фізично-хімічного складу.

Механічна (динамічна) дія – це розшарування, розриви та інші подібні ушкодження тканин організму, в тому числі м'язової тканини, стінок кровоносних судин, судин легеневої тканини внаслідок електродинамічного ефекту, а також миттєвого вибухоподібного утворення пари від перегрітої струмом тканинної рідини та крові.

Біологічна дія струму проявляється через подразнення та збудження живих тканин організму, а також через порушення внутрішніх біологічних процесів, що відбуваються в організмі і котрі тісно пов'язані з його життєвими функціями. Різноманітність впливу електричного струму на організм людини призводять до електротравм, котрі умовно поділяються на два види:

- загальні електротравми;
- місцеві електротравми.

Місцева електротравма – яскраво виявлене порушення щільності тканин тіла, в тому числі кісток, викликане впливом електричного струму або

електричної дуги. Найчастіше – це поверхневі ушкодження, тобто ушкодження шкіри, а інколи й інших м'яких тканин, зв'язок або кісток.

Приблизно 75% випадків ушкодження людей струмом супроводжується виникненням місцевих електротравм; електричні опіки, електричні знаки, металізація шкіри, механічні пошкодження, електроофтальмія, змішані травми.

Причини електротравм:

- дотик до струмоведучих частин під напругою внаслідок недотримання правил безпеки, дефектів конструкції та монтажу електрообладнання;
- дотик до неструмоведучих частин, котрі опинились під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, перехрещування проводів;
- помилкове попадання напруги в установку, де працюють люди;
- відсутність надійних захисних пристроїв.

Класифікація методів безпечної експлуатації електроустановок:

1 – Застосуванням захисних мір.

Це схемні або конструктивні рішення які знижують небезпеку поразки людини електричним струмом. Умовно поділяються на захисні міри нормального режиму, аварійного режиму (у випадку появи напруги на корпусах електроустановок), комбінованої дії.

2 – Використанням електрозахисних засобів. Електрозахисті засоби – це вироби, що переносять або перевозять, які служать для захисту персоналу від ураження електричним струмом під час виконання робіт. До них відносяться: інструменти, спецодяг і захисні засоби.

3 – Дотримання захисних заходів. Захисні заходи – це сукупність вимог до працюючих і порядку виконання робіт. Захисні міри при нормальному режимі роботи електричних установок До захисних мір при нормальному режимі роботи електричних установок відносяться:

- ізоляція струмопровідних частин;
- недоступність струмопровідних частин;

Ізоляція струмопровідних частин – шар діелектрика або конструкція, виконана із діелектрика, при допомозі яких струмопровідні частини відокремлюються одна від одної або від інших конструктивних частин обладнання. Електроустановки в першу чергу мають робочу ізоляцію.

Робоча ізоляція – це така ізоляція, яка забезпечує протікання струму по потрібному шляху і безпечну експлуатацію обладнання. Ізоляція забезпечує безпеку завдяки тому, що діелектрик має великий опір електричному струму, який обмежує величину струму, який протікає через ізоляцію.

4.2 Фактори, що впливають на ступінь ураження людини електричним струмом

Всі фактори, які визначають небезпеку ураження електричним струмом, поділяються на дві групи:

- електричного характеру (напруга, величина струму, рід і частота струму, опір електричного ланцюга, заземлення, занулення);
- неелектричного характеру (індивідуальні особливості людини, її увага, шлях проходження струму через тіло людини, тривалість дії струму).

Ураження організму людини електричним струмом найчастіше залежить від:

- сили струму, що проходить через тіло людини;
- тривалості його дії;
- шляху проходження через тіло;
- індивідуальних особливостей організму людини;
- стану приміщення, в якому експлуатується електроустановка;
- площі контакту людини із струмоведучими частинами.

Неоднакова величина струму впливає по різному на організм людини.

Визначають такі порогові значення струму:

- пороговий відчутний струм;
- пороговий невідпускаючий струм;

- пороговий фібриляційний струм.

Пороговий відчутний струм — найменше значення відчутного струму, який під час проходження через організм людини викликає почуття подразнення (0,6-1,5 мА при «мінному струмі частотою 50 Гц та 5-7 мА - при постійному струмі).

Пороговий невідпускаючий струм - найменше значення «електричного струму, що викликає при проходженні через організм людини непереборні судорожні скорочення м'язів руки, в якій затиснений провідник (10-15 мА при змінному струмі частотою 50 Гц і 50-80 мА - при постійному струмі).

Пороговий фібриляційний струм - найменше значення електричного струму, що викликає під час проходження через організм людини фібриляцію серця (100 мА при змінному струмі частотою 50 Гц і 300 мА - при постійному струмі).

Різні тканини людини по різному проводять струїв. Найбільший електричний опір має шкіра людини і особливе верхня ороговіла її частина, в якій немає кровоносних судин.

На результат ураження тіла (травми) впливає як силі так і шлях струму через тіло людини. Велика небезпек виникає тоді, коли струм проходить через основні органи серце, головний мозок, легені.

Шляхи струму в тілі людини називаються петлям: струму. З усіх випадків електротравматизму найчастіше зустрічаються такі петлі струму: права рука - ноги, рука - рука. За висновками лікарів, найбільш небезпечні петлі струму: голова - рука, голова - ноги, рука - рука. В ці петлі струму потрапляють основні органи людини, ураження яки призводить до тяжких наслідків.

Індивідуальні і психологічні фізичні особливості людини значно впливають на результат ураження електрострумом. Характер впливу струму однієї тієї ж величини залежить від маси тіла людини, її фізичного розвитку, віку, самопочуття.

Постійний струм біля 4-6 раз безпечніше змінного частотою 50 Гц. Постійний струм у порівнянні зі змінним того ж значення, коли проходить через тіло людини викликає слабкіші скорочення м'язів і менш несприятливі відчуття. Але це справедливо тільки для напруги до 500 В. При більш високій напрузі постійний струм стає небезпечніше змінного з частотою 50 Гц. Струм з частотою 500 кГц і більше з точки зору електричного удару вважається безпечним, але він може діяти вже як постійний струм, що викликає термічну дію. Умовно безпечною є напруга у 12 В, але залежно від сили струму, опору організм у людини та інших індивідуальних особливостей, терміну дії, умов виробництва та навколишнього середовища напруга у 12 В може стати небезпечною.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз показав, що для подолання нестабільності сонячної генерації та підвищення ККД станцій важливим є впровадження систем акумулювання енергії та алгоритмів відстеження точки максимальної потужності. Апаратним базисом для реалізації МРРТ-регулювання в архітектурах як мережевих, так і автономних інверторів є вхідні імпульсні DC-DC перетворювачі, які динамічно узгоджують режими роботи фотоелектричного модуля із зовнішнім навантаженням.

2. Порівняльний аналіз та розрахунок показали, що інвертуючий перетворювач та перетворювач за схемою Кука, на відміну від підвищувального перетворювача, забезпечують двостороннє регулювання напруги, що важливо для гнучкого узгодження динамічних ВАХ сонячних панелей із ланкою постійного струму інверторів.

3. Результати моделювання показали, що підвищувальний перетворювач створює значне імпульсне навантаження на фотоелектричний генератор. Натомість використання схеми Кука забезпечує краще згладжування пульсацій, мінімізує деградацію фотоелектричних комірок і гарантує плавне знімання енергії з максимально можливим ККД та високою завадостійкістю системи в широкому діапазоні зовнішніх збурень.

4. Встановлено, що для систем з екстремальним регулюванням на основі схеми Кука оптимальним є адаптивний алгоритм збурення та спостереження. Завдяки низькій обчислювальній складності він найменш вимогливий до ресурсів мікроконтролера, але при цьому забезпечує високу швидкість збіжності та точність досягнення точки максимальної потужності на рівні 95–99%.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Зайцев Є.О., Лежнюк П.Д., Кулик В.В. Оптимізація режимів роботи сонячних електростанцій за допомогою адаптивних алгоритмів / Є.О. Зайцев, П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 156 с.
2. Сокол Є.І., Замаруєв В.В., Стисло Б.О. Силова електроніка у системах сонячної генерації: Підручник / Є.І. Сокол, В.В. Замаруєв, Б.О. Стисло – Харків: НТУ «ХП», 2022. – 310 с.
3. S. Adak and H. Cangi, “The Quality Problems at Low Irradiance in the Grid-Connected Photovoltaic Systems,” *Electrical Engineering* 106 (2024): 6185–6197.
4. Hali and Y. Khelifi, “Photovoltaic Panel Parameters Determination Using Two Numerical Methods,” *Materials Today: Proceedings* 45 (2021): 7377–7382, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.313>.
5. Герега, С., Коваль, В. П., & Філюк, Я. О. (2017). Збільшення ефективності використання сонячних панелей. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 202-202.
6. M. Zaimi, H. El Achouby, O. Zegoudi, A. Ibral, and E. M. Assaid, “Numerical Method and New Analytical Models for Determining Temporal Changes of Model-Parameters to Predict Maximum Power and Efficiency of PV Module Operating Outdoor Under Arbitrary Conditions,” *Energy Conversion and Management* 220 (2020): 113071.
7. Павловський В.В., Блінов І.В., Кулик О.М. Порівняльний аналіз топологій $DC\text{-}DC$ перетворювачів для фотоелектричних модулів / В.В. Павловський, І.В. Блінов, О.М. Кулик // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2023. – № 2. – С. 78–86.
8. Abbassi, R. Gammoudi, M. Ali Dami, O. Hasnaoui, and M. Jemli, “An Improved Single-Diode Model Parameters Extraction at Different Operating

Conditions With a View to Modeling a Photovoltaic Generator: A Comparative Study,” *Solar Energy* 155 (2017): 478–489

9. Жуйков В.Я., Терещенко Т.О., Хижняк Т.А. Моделювання пристроїв силової електроніки в MATLAB Simulink: Навчальний посібник / В.Я. Жуйков, Т.О. Терещенко, Т.А. Хижняк – Київ: Кафедра, 2019. – 186 с.

10. V. J. Chin, Z. Salam, and K. Ishaque, “An Accurate Modelling of the Two-Diode Model of PV Module Using a Hybrid Solution Based on Differential Evolution,” *Energy Conversion and Management* 124 (2016): 42–50

11. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.

12. 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.