

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА
ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

бакалаврської кваліфікаційної роботи

Вдосконалення перетворювачів автономних систем
електроживлення від відновлювальних джерел енергії

Виконав:

студент 4 курсу, групи ЕТ 2022-1

Андрій ГЛУХОВ

Керівник бакалаврської роботи:

Олександр ДОНЕЦЬ

ХАРКІВ – 2026 р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О.М. Бекетова

Навчально-науковий інститут Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра Електричного транспорту
Освітньо-кваліфікаційний рівень Бакалавр
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма – Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ

 **Микола ХВОРОСТ**

“ 15 ” червня 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Глухов Андрій Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Вдосконалення перетворювачів автономних систем електроживлення від відновлювальних джерел енергії

керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи **Донець Олександр Вадимович, к.т.н., доцент**

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від “**22**” **травня** 2026 р. № 440-03

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи
20.06.2026 р.

3. Вихідні дані до бакалаврської роботи Матеріали переддипломної практики, Електричні схеми та фізичні моделі електроприводу змінного струму.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1. Стан питання. Виконати аналіз основні вимог, що висуваються до перетворювачів енергії від сонячних батарей.

4.2. Розробка технічного завдання.

Виконати розробку блок-схеми силових кіл перетворювачів, від відновлювальних джерел енергії.

4.3 Розрахункова частина (розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення)



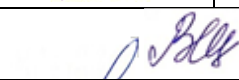

Виконати розрахунок перетворювача для автономних систем електроживлення на відновлюваних джерелах енергії.

4.4. Охорона праці. Забезпечення охорони праці на законодавчому рівні.

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

Варіанти підключення сонячної батареї до мережі; результати моделювання обох схем перетворювача; гібридна схема з геліогенератором, ветросиловою установкою; блок-схема силових кіл геліогенератора з перетворювальною системою; резонансний LCL-Т перетворювач та діаграми роботи.

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

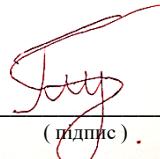
Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Олександр ДОНЕЦЬ, доц.		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інж.		
Нормоконтроль	Вячеслав ШАВКУН, доц.		

7. Дата видачі завдання 01.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

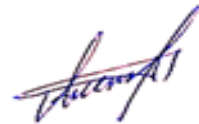
№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Стан питання	02.05.26-07.05.26	
2.	Розробка технічного завдання	07.05.26-13.05.26	
3.	Розрахункова частина	13.05.26-20.05.26	
4.	Охорона праці	20.05.26-28.05.26	
5.	Оформлення паперового та електронного варіантів роботи	28.05.26-10.06.26	
6.	Підготовка доповіді та презентації	12.06.26-19.06.26	

Студент


(підпис)

Андрій ГЛУХОВ
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Олександр ДОНЕЦЬ
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В бакалаврській кваліфікаційній роботі було виконано вдосконалення перетворювачів автономних систем електроживлення від відновлювальних джерел енергії.

Виконано аналіз основних вимог, що висуваються до перетворювачів енергії від сонячних батарей; можливість підвищення якості регулювання потужності в системі електропостачання із сонячною батареєю; аналіз роботи звичайного двотактного джерела безперебійного живлення змінного струму.

Виконано розробка блок-схеми силових кіл перетворювачів, від відновлювальних джерел енергії; використання монокристалічних кремнієвих фотоелементів як відновлювальних джерел енергії; розрахунок перетворювача для автономних систем електроживлення на відновлюваних джерелах енергії; розрахунок топологічної схеми резонансного перетворювача.

Склад бакалаврської роботи:

- листів розрахунково-пояснювальної записки - 57
- рисунків - 15
- таблиць - 0
- формул - 36
- Графічна частина до бакалаврської роботи складається з 10 слайдів.

ЗМІСТ

	Стор
ВСТУП.....	7
1 ОСНОВНІ ВИМОГИ, ЩО ВИСУВАЮТЬСЯ ДО ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ВІД СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ.....	9
1.1 Підвищення якості регулювання потужності в системі електропостачання із сонячною батареєю.....	18
1.2 Аналіз роботи звичайного двотактного ДБЖ змінного струму.....	20
2 РОЗРОБКА БЛОК-СХЕМИ СИЛОВИХ КІЛ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ, ВІД ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ	25
2.1 Використання монокристалічних кремнієвих фотоелементів як відновлювальних джерел енергії.....	25
2.2 Розробка математичної моделі сонячного елемента.....	31
3 РОЗРАХУНОК ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ НА ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЕНЕРГІЇ.....	37
3.1 Розрахунок топологічної схеми резонансного перетворювача.....	38
3.2 Розрахунок основних параметрів активного випрямляча.....	41
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	47
4.1 Задачі розділу.....	47
4.2 Електробезпека.....	48
4.3 Захист від електромагнітного та іонізуючого випромінювання.....	52
4.4 Пожежна безпека.....	53

ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ПОСИЛАНЬ.....	57

ВСТУП

У сучасних електроенергетичних системах, зважаючи на вичерпання викопних ресурсів, відновлювана енергетика набуває стратегічного значення. Особливу увагу приділяють розвитку сонячної енергетики, яка є найдинамічнішою складовою відновлюваних джерел.

Станом на кінець 2022 року загальносвітова встановлена потужність фотоелектричних перетворювачів перевищила 100 ГВт, що наближено на 30 ГВт більше, ніж у 2021 році.

Середня річна кількість сонячного випромінювання в Україні співставна з показниками Німеччини, яка є світовим лідером за встановленою потужністю фотоелектричних установок.

Очікується, що до кінця 2033 року сукупна потужність сонячних електростанцій в Україні досягне приблизно 970 МВт. Примітно, що третина цієї потужності належить компанії Activ Solar — австрійсько-українському підприємству, яке займає провідні позиції у сфері розвитку сонячної енергетики в Україні.

Найзначніша частина потужностей для генерації електроенергії зосереджена в Київській, Донецькій, Черкаській та інших областях.

Найефективнішим способом використання виробленої сонячної енергії є її постачання до загальної мережі, тобто інтеграція фотоелектричних установок в існуючу електромережу.

В роботі потрібно провести всебічне порівняння як за якісними, так і за кількісними показниками, відомих та нових підходів до синхронізації енергії, що надходить від фотоелектричних перетворювачів, з мережею.

Однокаскадні інверторні рішення залишаються поза увагою, оскільки не дозволяють ефективно реалізувати функцію відбору максимальної потужності. Зокрема, у межах даного дослідження проведено ретельний порівняльний аналіз традиційного підвищуючого струмового інвертора та нової розробки — інвертора з квазі-імпедансною (КІ) ланкою [1, 2].

Актуальність теми обумовлена збільшенням вимог енергозбереження та якістю регулювання сучасного електроприводу з імпульсною системою керування.

Мета: вдосконалення перетворювачів автономних систем електроживлення від відновлювальних джерел енергії.

Завдання:

Виконати аналіз елементів широтно-імпульсних перетворювачів з метою застосування у системі плавного пуску електроприводу.

Запропонувати структурну схему автоматизованого електроприводу з двигуном постійного струму.

Виконати розрахунок запропонованої принципової схеми з транзисторним широтно-імпульсним перетворювачем.

Апробація: Мещеряков В. С., Глухов А. А. Основні напрями забезпечення надійності систем електропостачання / XIX ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ «СТАЛІЙ РОЗВИТОК МІСТ: ПОСТВОЄННИЙ ПЕРІОД» 18 квітня 2026 р м. Харків.

1 ОСНОВНІ ВИМОГИ, ЩО ВИСУВАЮТЬСЯ ДО ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ВІД СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

Сучасне інверторне обладнання, яке забезпечує видачу сонячної генерації в загальну енергосистему, має задовольняти три базові вимоги: стійко працювати при суттєвих перепадах напруги на вході, підтримувати безперервність вхідного струму та гарантувати належну якість напруги на виході.

Зокрема, мінімізація вхідних пульсацій є критичним фактором для підвищення ККД та подовження експлуатаційного ресурсу фотомодулів. Водночас характеристики струму, що постачається в мережу, жорстко лімітовані нормативами – наприклад, граничний рівень сумарних гармонійних спотворень не може перевищувати 5%.

Крім того, галузеві нормативи встановлюють суворі ліміти на коефіцієнт потужності та рівень інжекції постійного струму в енергосистему. Розробка перетворювачів із широким діапазоном вхідних напруг є об'єктивною необхідністю через суттєву мінливість вихідних характеристик сонячних модулів. Під впливом зовнішніх факторів напруга панелей здатна варіюватися в межах 60–120% відносно номінального значення, яке фіксується в точці максимальної потужності (MPP) [3].

Зазвичай під час монтажу сонячних батарей виникає потреба в їхньому заземленні, що є важливим фактором при їх інтеграції в електромережу. В однофазних інверторах малої потужності (до 5 кВт) гальванічна ізоляція між перетворювачем та мережею може бути відсутня, якщо заземлено нульовий провідник (нейтраль) мережі.

У тих конфігураціях, де гальванічна розв'язка є обов'язковою, її реалізують за допомогою високочастотного або низькочастотного (мережевого) трансформатора. Базові схеми підключення фотоелектричних панелей до енергосистеми представлено на рисунку 1.1 [3].

Наприклад, на рисунку 1.1 (позиція "а") представлено варіант реалізації, що не передбачає використання гальванічної розв'язки. Натомість, рисунок 1.2,б демонструє альтернативні методи здійснення гальванічної розв'язки, зокрема, із застосуванням високочастотного чи мережевого трансформаторів.

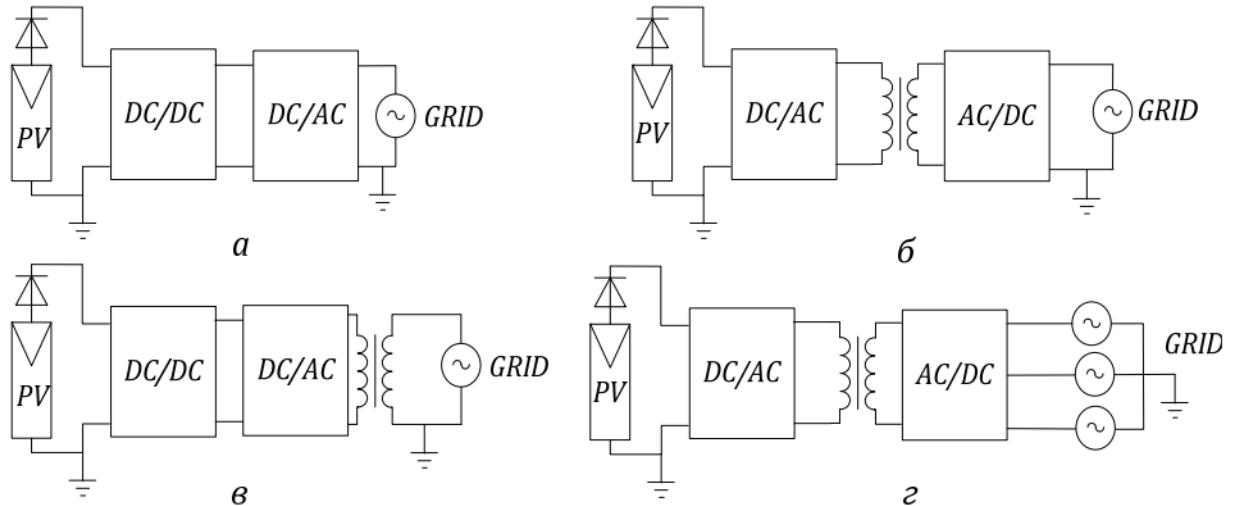


Рисунок 1.1 – Варіанти підключення сонячної батареї до мережі

Схемотехнічне рішення трифазного перетворювача з високочастотним трансформатором проілюстровано на рисунку 1.1, г. Окремим критично важливим завданням під час розробки таких систем є реалізація функції виявлення знеструмлення мережі (захисту від роботи в автономному режимі / Anti-Islanding), що зазвичай забезпечується завдяки спеціальним алгоритмам у системі керування.

Кількість фаз інверторної установки безпосередньо корелює з її генерованою потужністю: для розподілених систем низької потужності (до 5 кВт) стандартним вибором є однофазні пристрої. Проектування будь-яких конфігурацій сильних перетворювачів обов'язково базується на суворому дотриманні згаданих вище нормативних обмежень.

Детальніший порівняльний аналіз поширених схемотехнічних конфігурацій разом із принципами відстеження точки максимальної потужності (MPPT) висвітлено у наукових джерелах [4, 5].

Серед порівняно нових рішень слід виділити імпульсні та квазіімпульсні інвертори (КІІ), запропоновані для інтеграції низьковольтних джерел енергії в електричну мережу [6, 7].

КІІ дозволяють обійти обмеження класичних топологій, оскільки здатні як підвищувати чи знижувати, так і інвертувати вхідну напругу. Ефект підвищення вхідної напруги в КІІ досягається завдяки використанню стану наскрізної провідності плеча інвертора.

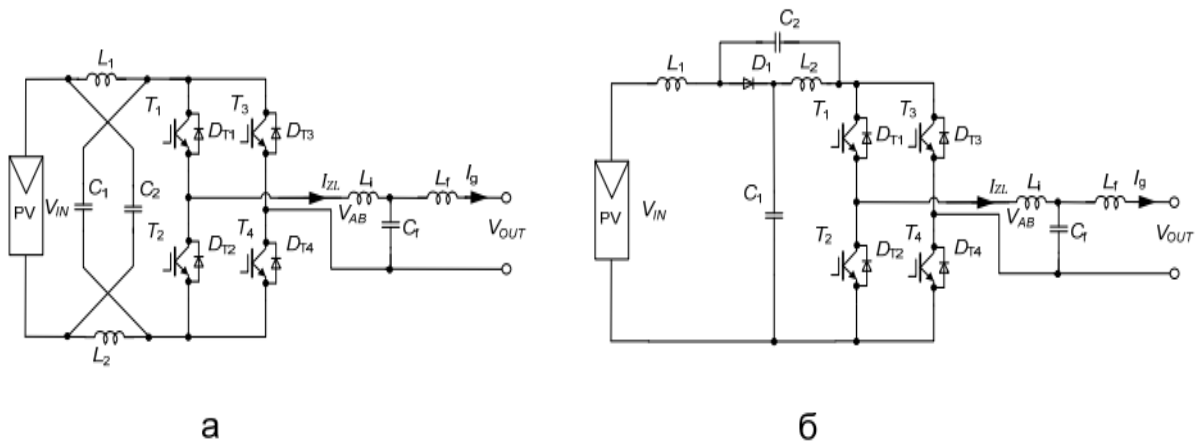


Рисунок 1.2 – Можливі рішення гальванічної ізоляції з високочастотним та мережевим трансформаторами

Додатковою перевагою зазначених схемотехнічних рішень є підвищений рівень надійності, що зумовлено їхньою природною стійкістю до виникнення аварійних наскрізних струмів у стійках інвертора.

Безперервний характер вхідного струму в КІІ активізував наукові дослідження, спрямовані на інтеграцію квазі-Z-ланки в інтерфейсні перетворювачі систем відстеження точки максимальної потужності (MPPT).

Водночас серед класичних і найбільш поширених конфігурацій варто відзначити традиційну двокаскадну топологію, яка поєднує в собі вхідний підвищувальний перетворювач та вихідний інвертор (рис. 1.3, а).

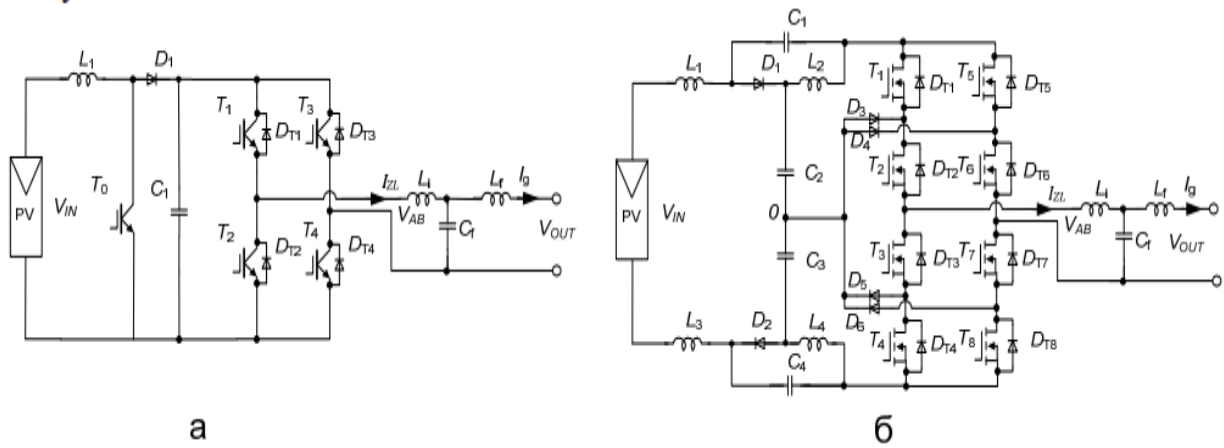


Рисунок 1.3 – Можливі рішення гальванічної ізоляції з високочастотним та мережевим трансформаторами

Описана конфігурація забезпечує ефективне відстеження точки максимальної потужності фотоелектричної батареї з подальшою її видачею в енергосистему. Вона характеризується безперервністю вхідного струму, а її ККД сягає 85–95%. Перспективною альтернативою є нещодавно запропонована топологія на основі трирівневого інвертора з фіксацією нейтральної точки (NPC) та квазі-Z-ланки рисунок 1.3, б).

Попри потенціал, принципи функціонування, сильні та слабкі сторони цієї архітектури, а також її безпосереднє зіставлення з класичними двокаскадними системами «підвищувальний перетворювач – інвертор» залишаються нетривіальними, а наукові праці, присвячені їхньому прямому порівняльному аналізу, наразі відсутні.

Об'єктом порівняльного аналізу визначено номінальні параметри пасивних компонентів, критерії вибору силових напівпровідникових приладів за фіксованих характеристик вхідного струму й якості вихідної напруги, а також граничний ККД та робочий діапазон вхідної напруги.

Такі базові критерії, як вихідна потужність і напруга, амплітуда пульсацій струму на вході та напруга в ланці постійного струму, представлені у відносних одиницях.

При цьому гранично допустиме значення коефіцієнта (глибини) модуляції встановлено на рівні 0,75.

Перевагою першої схеми є ширший робочий діапазон вхідної напруги, що забезпечується завдяки використанню розділеної (розщепленої) ланки постійного струму. Водночас для обох конфігурацій припускається, що максимальний коефіцієнт підвищення вхідної напруги не перевищує двох.

Розрахунок номінальних параметрів пасивних компонентів підвищувального каскаду виконаємо на основі заданої частоти комутації силових транзисторів, напруги КВ-ланки постійного струму, а також допустимого коефіцієнта пульсацій струму на вході.

$$L_1 \geq \frac{V_{OUT}^2}{4K_{HC}P_{OUT}f_{SW}} \quad (1.1)$$

де P_{OUT} – номінальна вихідна потужність.

Слід наголосити, що пульсації вхідного струму в однофазних системах мають двокомпонентний характер: вони містять високочастотну складову (КВЧ), що визначається частотою комутації силових транзисторів, та низькочастотну складову, яка зумовлена коливаннями потужності на подвоєній частоті мережі 100 Гц.

$$C_1 \geq \frac{TP_{OUT}}{4\pi K_V V_{OUT}^2} \quad (1.2)$$

Розглянемо стандартний підхід до проектування. Вхідний дросель призначений для обмеження високочастотних пульсацій вхідного струму в режимі підвищення напруги.

Своєю чергою, ємність конденсатора ланки постійного струму розраховується так, щоб за наявності коливань потужності на частоті 100 Гц, що є характерним для однофазних систем перетворення, амплітуда пульсацій напруги не перевищувала встановленої норми, де T – період напруги мережі.

Однак ці співвідношення не дозволяють визначити параметри компонентів, що забезпечують безперервний режим вхідного струму.

Очевидно, що низькочастотні пульсації напруги в ланці постійного струму викликають відповідні низькочастотні коливання вхідного струму.

Якщо припустити, що частота комутації напівпровідникових ключів є суттєво вищою за частоту мережі, то можна обґрунтувати, що низькочастотна складова напруги на конденсаторі є прямо пропорційною низькочастотним коливанням напруги на вхідному дроселі.

Саме це й зумовлює появу змінної низькочастотної складової у вхідному струмі:

$$2 * 2\pi * f * L_1 * K_{LC} * I_{IN} = K_V * V_{DC} \quad (1.3)$$

де f – частота напруги,

V_{DC} – напруга на конденсаторі,

DC - відносна тривалість відкритого транзистора.

Використовуючи рівняння (1.1) за заданих значень частоти комутації транзисторів та припустимого коефіцієнта пульсацій вхідного струму, можна обчислити необхідну індуктивність дроселя.

Своєю чергою, рівняння (1.3) дозволяє на основі низькочастотних пульсацій струму визначити амплітуду коливань напруги на конденсаторі, що надалі дає змогу розрахувати його номінальну ємність за допомогою виразу (1.2).

Слід наголосити, що розрахунок вхідного струму базується на величині вихідної потужності, а напруга в ланці постійного струму приймається рівною амплітудному значенню вихідної напруги. Таким чином, підсумкова система нерівностей для визначення параметрів пасивних компонентів має такий вигляд:

$$L_1 \geq \frac{V_{OUT}^2(1-2*D_S)}{(1-D_S)K_{HC}P_{OUT}} T_S D_S \quad (1.4)$$

$$C_1 \geq \frac{TP_{OUT}(1-D_S)^2}{2\pi K_V V_{OUT}^2 D_S} \quad (1.5)$$

$$C_2 \geq \frac{TP_{OUT}(1-D_S)}{2\pi K_V V_{OUT}^2} \quad (1.6)$$

Водночас варто зауважити, що коефіцієнти пульсацій визначаються як відношення розмаху коливань (подвійної амплітуди) до середнього значення величини. Для забезпечення режиму безперервного вхідного струму сумарний коефіцієнт пульсацій має бути меншим за дві одиниці (менше 200%).

Відповідно до цього було встановлено такі вимоги: рівень високочастотних пульсацій вхідного струму не повинен перевищувати 10%, а низькочастотних – 150%, що в сукупності гарантує дотримання умови безперервності струму.

Розрахунок виконано для номінальної потужності 2800 Вт та частоти комутації силових ключів 100 кГц. Для узагальнення отриманих результатів усі дані в таблиці представлені у відносних одиницях.

Базові значення напруги та струму визначені відповідно через їхні амплітудні та діючі (ефективні) величини. Мінімальне розрахункове значення індуктивності становить 290 мкГн, а ємності – 1,3 мКф.

У класичному підвищувальному перетворювачі, попри меншу кількість напівпровідникових компонентів, напруга на силових ключах є вдвічі вищою порівняно з трирівневим квазіімпульсним (КІ) перетворювачем. Крім того, перша схема потребує значно більшої індуктивності дроселя, ніж друга. Хоча розраховані значення ємностей конденсаторів в обох конфігураціях є близькими, робоча напруга на них у квазіімпульсній топології є суттєво нижчою.

Результати моделювання обох схем представлені на рисунку 1.4.

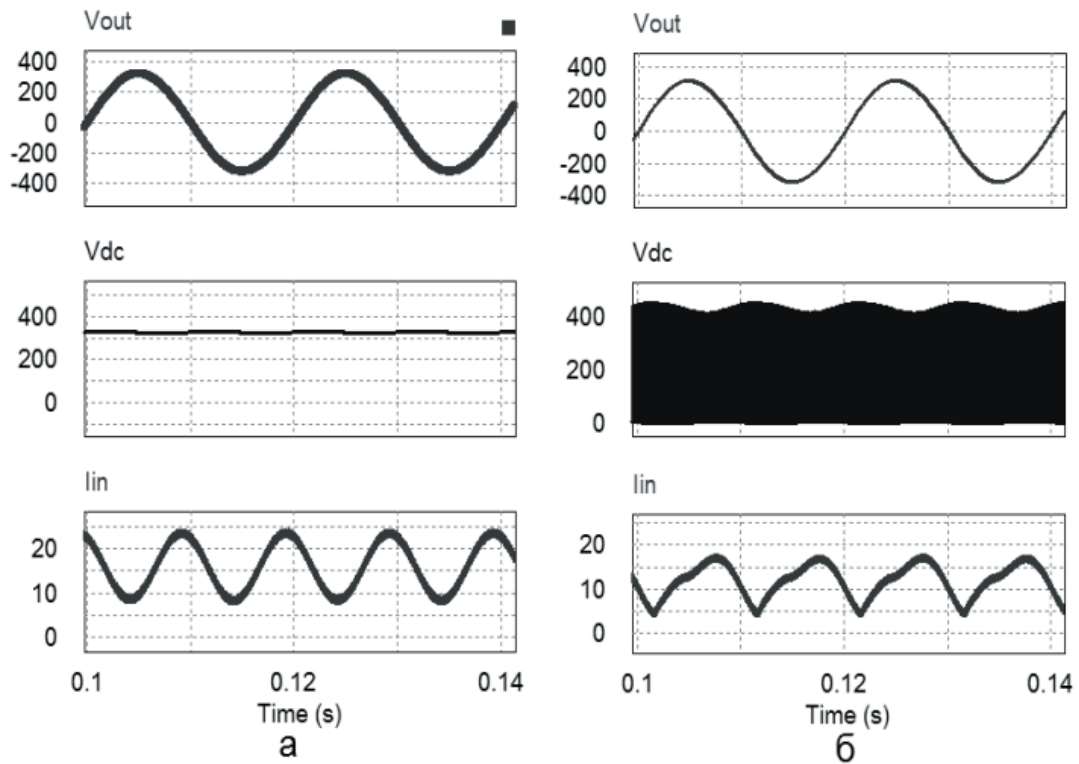


Рисунок 1.4 – Результати моделювання обох схем перетворювача

Як видно з рисунка 1.4, а, вхідний струм підвищувального інвертора має безперервний характер, а рівень низькочастотних пульсацій є близьким до теоретично розрахованих значень. На рисунку 1.4, б представлено еквівалентні схеми перетворювача з прямою передачею енергії.

Пульсації вхідного струму в цьому сценарії так само залишаються близькими до прогнозних показників, проте їхня відносна амплітуда є вищою, а форма профілю дещо відхиляється від синусоїдальної.

Варто також зауважити, що напруга в ланці постійного струму у другому сценарії є вищою та містить високочастотні пульсації, що свідчить про наявність режиму наскрізної (або паралельної) провідності транзисторів.

На рисунку 1.5 окремо проілюстровано високочастотні коливання вхідного струму для кожної з розглянутих схем, що безпосередньо підтверджує правильність зроблених аналітичних припущень.

Завершивши порівняльний аналіз підвищувальних перетворювачів, призначених для інтеграції енергії фотоелектричних панелей у загальну мережу, ми зосередили увагу на дослідженні двох базових конфігурацій.

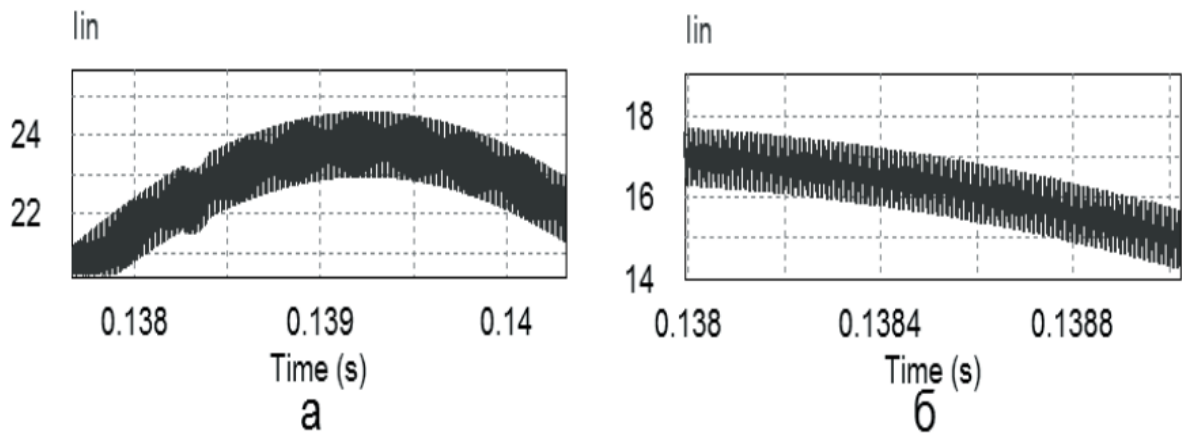


Рисунок 1.5 – Високочастотні варіації вхідного струму для кожної зі схем

Завершено порівняльну оцінку класичного підходу, що базується на двокаскадній системі «підвищувальний перетворювач – інвертор», та новітньої архітектури на основі трирівневого квазіімпедансного інвертора.

Показано, що попри очевидне збільшення кількості напівпровідникових ключів та пасивних компонентів у другій конфігурації, зниження рівня напруги на елементах та менші потрібні номінали деталей дозволяють обом схемам бути цілком співмірними за масогабаритними показниками. Даний висновок є справедливим за умови забезпечення ідентичної якості вхідного струму та вихідної напруги перетворювачів.

Крім того, слід звернути увагу на те, що завдяки зниженій блокувальній напрузі на транзисторах трирівневого інвертора у ролі силових ключів можна ефективно використовувати високочастотні польові транзистори (MOSFET).

Такий підхід не лише забезпечує вищу швидкість комутації, а й дозволяє мінімізувати масогабаритні показники пасивних компонентів схеми та вихідного фільтра.

Особливої уваги заслуговує експлуатаційна надійність цього інженерного рішення, що відзначається високою стійкістю до хибних або мимовільних спрацьовувань напівпровідникових елементів.

1.1 Підвищення якості регулювання потужності в системі електропостачання із сонячною батареєю

З метою підвищення стійкості та забезпечення цілісності інформаційних систем у складі електротехнічних комплексів запропоновано впровадження спільної інфраструктури на базі об'єднаних центрів обробки даних (ЦОД).

Функціонування таких дата-центрів є ключовим чинником у забезпеченні доступу до сучасних інтернет-технологій для підприємств малого бізнесу. Відповідно до концепції хмарних обчислень (Cloud Computing), для невеликих компаній оренда необхідних обчислювальних потужностей у великих провайдерів є економічно доцільнішою, ніж покриття операційних витрат на електропостачання та сервісне обслуговування власного серверного обладнання.

Крім того, такий підхід дозволяє ефективніше виконувати жорсткі вимоги міжнародних стандартів щодо технічних характеристик апаратного забезпечення.

Для забезпечення безперебійного функціонування обладнання комплекс заходів із резервного енергопостачання необхідно проектувати заздалегідь — ще на етапі підготовки до можливих технологічних простоїв [3]. Ключовим параметром для систем живлення центрів обробки даних (ЦОД) є робочий діапазон вхідної напруги.

Цей показник визначає межі відхилення мережевої напруги, за яких джерело безперебійного живлення (ДБЖ) здатне підтримувати стабільну вихідну напругу без переходу на акумуляторні батареї (АКБ). Якщо ж параметри мережі виходять за межі припустимого діапазону, система перемикається на живлення від АКБ, тривалість якого обмежується часом автономної роботи ДБЖ (у годинах) [6]:

$$R_t = \frac{Q}{1,3I_{\text{рез}}k_n k_{\text{пп}}} \quad (1.7)$$

де Q – ємність АКБ;

Ірез – струм, який повинен забезпечуватись джерелом при відключенні мережі від резервних батарей;

кп – коефіцієнт перетворення (кп = 1 для джерел без перетворення напруги, кп = 2 для джерел із перетворенням напруги);

кпп – коефіцієнт втрат під час перетворення (кпп = 1 для джерел без перетворення напруги, кпп = 1,3 для джерел із перетворенням напруги).

Згодом у роботу вступає резервне джерело — як правило, дизель-генераторна установка (ДГУ).

Варто враховувати: що більше етапів трансформації напруги в мережі, то менше працюватиме ДБЖ від акумулятора, оскільки на кожне перетворення витрачається дорогоцінна енергія.

Наприклад, у системах безперебійного електроживлення (СБЕ) на основі ДБЖ змінного струму електрика зазнає трикратного перетворення:

- Етап 1: У самому ДБЖ зі змінного струму в постійний (для акумулятора).
- Етап 2: Знову в ДБЖ з постійного струму назад у змінний.
- Етап 3: У блоці живлення пристрою зі змінного струму в постійний, необхідний для роботи кінцевого обладнання.

У системах постійного струму перетворення енергії зі змінного струму в постійний здійснюється виключно на етапі функціонування випрямного пристрою.

Попри певні переваги, такі конфігурації мають суттєві обмеження: зокрема, транспортування енергії за низьких рівнів напруги постійного струму зумовлює потребу у використанні кабельних ліній із більшою площею поперечного перерізу задля мінімізації теплових втрат.

Через цей чинник, а також внаслідок складності масштабування напруги, системи постійного струму наразі не набули масового розповсюдження в розподільчих мережах.

1.2 Аналіз роботи звичайного двотактного ДБЖ змінного струму

Передбачається, що у разі переходу на резервне живлення від ДБЖ спочатку виконується коректне завершення роботи програмних додатків на клієнтських робочих станціях із обов'язковим збереженням усіх поточних даних, і лише після цього здійснюється зупинка програмного забезпечення на серверах. Проте такий сценарій вимушеного припинення процесів прямо суперечить вимогам щодо забезпечення безперервності функціонування системи в аварійних режимах, оскільки точний час відновлення основного електропостачання залишається невизначеним.

Жорсткі вимоги щодо забезпечення безперервності процесів та оперативного відновлення критично важливих сервісів інформаційної системи обмежують граничне значення показника RTO (Recovery Time Objective – цільовий час відновлення) однією годиною.

Задля підтримання працездатності комплексу в режимі реального часу в умовах тривалого знеструмлення, після вичерпання ємності акумуляторних батарей джерел безперебійного живлення (ДБЖ) передбачено активацію додаткового резервного джерела – як правило, дизель-генераторної установки (ДГУ).

Розглянемо експлуатаційні характеристики дизель-генераторних установок (ДГУ). Запуск цих агрегатів здійснюється в автоматичному режимі або за допомогою дистанційного керування, причому вони здатні тривалий час функціонувати без безпосередньої присутності обслуговуючого персоналу.

Для генераторних установок потужністю до 110 кВт цей період становить не менше 150 годин, а для моделей потужністю понад 110 кВт – не менше 240 годин.

На рисунку 1.6 наведено комбіновану схему відповідної енергетичної установки. Слід зазначити, що як альтернатива ДГУ в таких системах може застосовуватися агрегат, який функціонує на зрідженому газі. Крім того, повністю автономна система енергозабезпечення за певних умов здатна працювати без залучення паливних генераторів та без підключення до централізованої електромережі.

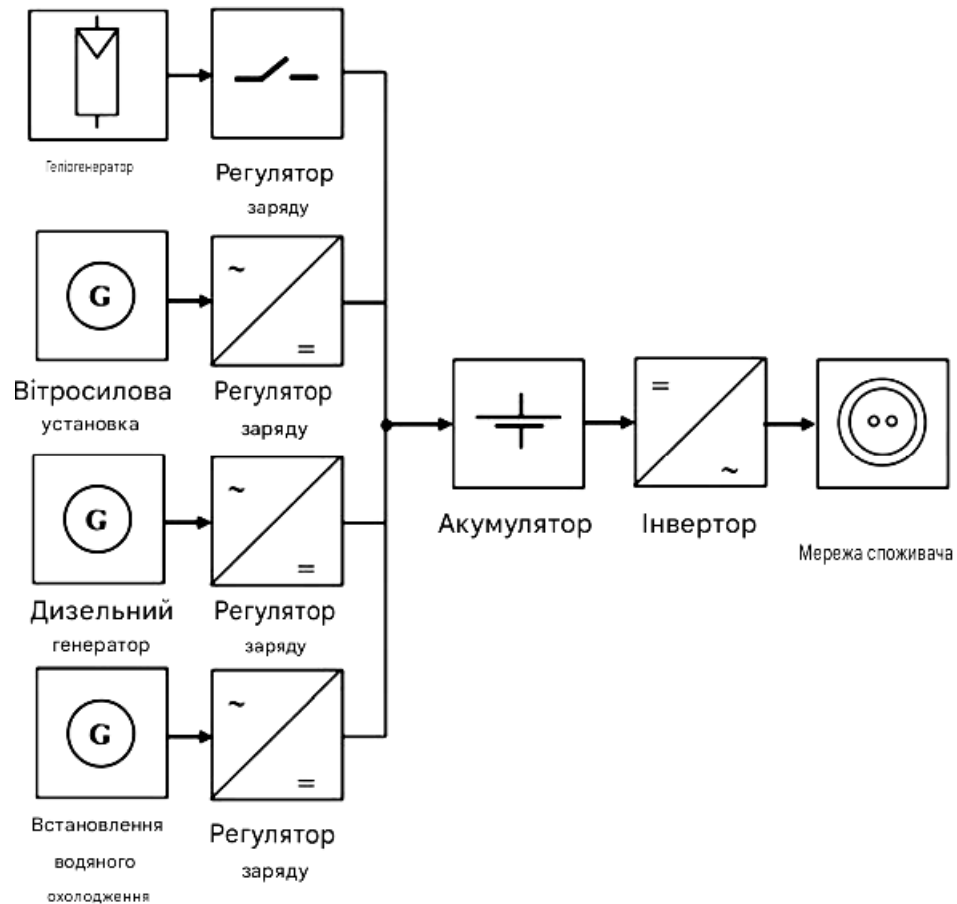


Рисунок 1.6 – Гібридна схема з геліогенератором, ветросиловою установкою, дизельним генератором, установкою водяного (повітряного) охолодження

Розглянемо доцільність інтеграції геліосистеми як основного, допоміжного або резервного джерела електропостачання для автономних мереж з метою зниження операційних витрат на енергоспоживання та сервісне обслуговування інфраструктури центрів обробки даних (ЦОД).

Враховуючи специфіку генерації сонячної енергії, об'єкти ЦОД запропоновано розміщувати за межами великих мегаполісів – переважно в

регіонах, розташованих на широтах до 45° пн. ш., які характеризуються високим рівнем інсоляції.

Для безперебійного живлення серверного обладнання необхідне впровадження фотоелектричних установок середньої та великої потужності, здатних забезпечувати стабільну подачу змінного струму з номінальною напругою 220 В.

Для оптимізації електропостачання обладнання центру обробки даних (ЦОД), що функціонує на змінному струмі, у запропоновану схему (рис. 1) інтегровано автономний інвертор. Акумуляторна батарея виконує функцію накопичення енергії, яка виробляється сонячним генератором, та її подальшої передачі споживачам в періоди низької інсоляції або у нічний час.

Водночас інтеграція вітроенергетичної установки не лише забезпечує додатковий рівень резервування гібридної системи живлення в регіонах із високим вітровим потенціалом, а й дозволяє безпосередньо використовувати вітрову генерацію для живлення кліматичних систем (охолодження) технологічного устаткування.

Завдяки інтеграції зазначеної установки в загальну систему, частота запусків та тривалість роботи дизель-генератора суттєво зменшуються, що забезпечує значне скорочення споживання палива та заощадження його моторесурсу.

Водночас застосування системи водяного охолодження дозволяє ефективно відводити надлишкове тепло від обчислювального устаткування дата-центра. Це знижує загальне навантаження на допоміжні інженерні підсистеми та спрощує процес підтримання стабільного температурного режиму в робочих зонах ЦОД.

Використання геліогенератора як основного джерела енергії в автономних системах електропостачання набуває особливої актуальності у контексті сучасних розробок із розгортання мобільних (пересувних) центрів обробки даних (ЦОД). Ключовими перевагами такого технологічного рішення є висока гнучкість у виборі локації для розміщення обчислювальних

потужностей, можливість оперативної релокації комплексу, а також суттєве скорочення термінів введення в експлуатацію порівняно зі стаціонарними об'єктами. Стислі терміни запуску зумовлені тим, що всі інженерні та апаратні підсистеми мобільного ЦОД є попередньо інтегрованими, налаштованими та протестованими на етапі виробництва.

Крім того, даний підхід дозволяє оптимізувати витрати шляхом територіального наближення об'єкта до економічно вигідних джерел енергії, нівелює потребу в оренді капітальних споруд та гарантує збереження інвестицій у разі зміни локації чи переміщення офісу компанії.

Під час проєктування інфраструктури мобільного ЦОД необхідно враховувати комплекс жорстких вимог та обмежень, зокрема: дефіцит корисної площі, високу щільність тепловиділення, адаптованість до експлуатації у важкодоступних регіонах із несприятливими кліматичними умовами, а також мінімізацію чисельності обслуговуючого персоналу.

Задля ефективної утилізації значних обсягів надлишкового тепла від серверного устаткування запропоновано використовувати водні ресурси навколишнього середовища. Слід зауважити, що такий підхід має успішне світове підґрунтя: ще у 2008 році компанія Google запатентувала власну концепцію екологічного обчислювального комплексу на водній основі (Water-based data center).

Стосовно експлуатації фотоелектричних модулів, то їхні вихідні характеристики визначаються міжнародними стандартами для так званих стандартних умов випробувань (STC).

Ці умови регламентують щільність потоку сонячного випромінювання на рівні 1000 Вт/м^2 , фіксовану температуру напівпровідникової структури фотоелементів 25°C та спектральний склад світла, характерний для атмосферної маси AM1.5 (45° північної широти).

Максимальна генерація енергії, зафіксована за таких параметрів, приймається за номінальну (пікову) потужність елементів. Типові фотоелектричні панелі наземного базування містять 36 послідовно з'єднаних

сонячних комірок; така схемотехнічна конфігурація є оптимальною для забезпечення ефективного заряджання свинцево-кислотних акумуляторних батарей із номінальною напругою 12 В.

За температури 25 °С робоча напруга фотоелектричного модуля становить приблизно 16–17 В (що відповідає 0,45–0,47 В на один елемент). Зазначений надлишок напруги є конструктивно необхідним для компенсації її температурного падіння, зумовленого нагріванням напівпровідникової структури під дією сонячної радіації.

Модуль обрамлено жорсткою алюмінієвою рамою, яка спрощує його фіксацію на тримальній (опорній) конструкції. Одинична потужність таких модулів перебуває в діапазоні від 10 до 300 Вт. Для одержання заданих вихідних параметрів за струмом та напругою окремі модулі комутують послідовно, паралельно або за змішаною схемою, формуючи сонячну батарею з необхідними характеристиками.

2 РОЗРОБКА БЛОК-СХЕМИ СИЛОВИХ КІЛ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ, ВІД ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

2.1 Використання монокристалічних кремнієвих фотоелементів як відновлювальних джерел енергії

Коефіцієнт корисної дії (ККД) передових зразків сонячних монокристалічних кремнієвих фотоелементів становить 15–30%, тоді як для масових серійних аналогів цей показник перебуває в межах 10–15%.

Головними недоліками таких фотоелектричних перетворювачів є значна вартість та відносно низька ефективність. Водночас перехід на напівпровідникові гетероструктури на основі арсеніду галію й алюмінію та інтеграція оптичних концентраторів сонячної радіації з коефіцієнтом посилення 50–100 дозволяє суттєво підвищити ККД системи – до рівня 35–40% [7].

Попри відносно низькі показники коефіцієнта корисної дії, фотоелектричні модулі мають низку суттєвих експлуатаційних та екологічних переваг:

- Акустичний комфорт: повна безшумність процесу генерації електроенергії.
- Висока надійність: відсутність рухомих конструктивних елементів, що мінімізує механічний знос та ймовірність відмов.
- Довговічність: тривалий життєвий цикл системи, причому гарантійний термін ефективної експлуатації сучасних панелей сягає 26 років.
- Ефект самоочищення: за умови встановлення модулів під певним кутом нахилу, звичайні атмосферні опади середньої інтенсивності ефективно змивають накопичений пил, нівелюючи фактор забруднення.
- Економічність: мінімальні операційні витрати на технічне обслуговування та поточне утримання інфраструктури.

- Універсальність інтеграції: висока конструктивна гнучкість, що дозволяє монтувати фотоелементи в інженерні конструкції будівель або безпосередньо в корпуси автономних приладів.
- Екологічна безпека: повна відсутність шкідливих викидів та антропогенного впливу на довкілля під час роботи.

Таким чином, за комплексом експлуатаційних характеристик геліогенератори переважають традиційні дизель-генераторні установки (ДГУ). Водночас реальна потужність сонячної батареї завжди є меншою за арифметичну суму потужностей її окремих модулів через втрати від неузгодженості параметрів (місмечу), спричинені технологічним розкидом характеристик однотипних компонентів.

Граничне зменшення цих розбіжностей дозволяє мінімізувати внутрішні втрати системи. Особливу увагу слід приділити ризикам затінення: у разі перекриття світлового потоку на одному з модулів (або його частині) у послідовно з'єднаному ланцюгу виникає «ефект гарячої плями». За таких умов затінений елемент переходить у режим споживання, починає розсіювати всю корисну потужність, що генерується освітленими ділянками, стрімко перегрівається і внаслідок термічного руйнування виходить з ладу.

Для нівелювання цього деструктивного ефекту паралельно до кожного модуля (або його окремої секції) інтегрують шунтувальний (обхідний) діод. Встановлення таких компонентів є обов'язковим за умови послідовного з'єднання більше ніж двох модулів у ланцюг.

Крім того, на виході кожної паралельної гілки (стріngu) підключають блокувальний діод, який забезпечує вирівнювання напруг між гілками та запобігає протіканню зворотних струмів.

Слід також враховувати, що поточна робоча точка сонячної батареї, підключеної до навантаження, далеко не завжди збігається з точкою максимальної потужності (ТМП). Положення ТМП не є стабільним і

динамічно змінюється залежно від рівня інсоляції та температури навколишнього середовища.

Підключення потужного навантаження (зокрема, під час пуску двигуна) може призвести до зсуву робочої точки системи в область мінімальної або нульової потужності, що унеможливить запуск електропривода. Для запобігання цьому явищу необхідний напівпровідниковий перетворювач, здатний динамічно узгоджувати параметри сонячної батареї з характеристиками навантаження.

Як такий пристрій найчастіше інтегрують керовані блоки силової електроніки, вихідні характеристики яких повністю задовольняють сучасні стандарти щодо якості електроенергії [8, 9]. Принцип дії відповідного регулятора пошуку точки максимальної потужності (ТМП) сонячної батареї базується на методі періодичних коротких збурень (крокового сканування) робочої точки.

Якщо на поточному кроці пошуку вихідна потужність приладу зростає, то під час наступного такту алгоритм продовжує зміщувати робочу точку в тому самому напрямку.

Таким чином, забезпечується безперервна оптимізація характеристик навантаження для максимізації відбору потужності, а також реалізується можливість регулювання в широкому динамічному діапазоні та формування імпульсів струму, здатних забезпечити ефективне зарядження АКБ навіть за умов низької інсоляції.

У режимах із високодинамічною зміною рівня освітленості базовий алгоритм доцільно доповнювати функцією фіксації в пристрої пам'яті (ПП) типових траєкторій зсуву робочої точки. Це дозволяє мінімізувати кількість хибних кроків пошуку й скоротити час адаптації системи.

На виході регулятора формуються імпульси постійного струму, параметри яких (ширина та частота проходження) динамічно коригуються залежно від поточної генерації фотоелектричної батареї.

У випадку, коли робоча напруга навантаження є нижчою за робочу напругу фотоелектричного модуля, за принципом трансформації енергії з'являється можливість отримання у навантаженні струмів, що перевищують струм короткого замикання сонячної батареї. Під час розрахунків слід враховувати, що коефіцієнт корисної дії (ККД) таких регуляторів становить 85–95%.

Нижче розглянуто схемотехнічну реалізацію активного керованого випрямляча (АКВ) на базі трифазної мостової топології з використанням силових IGBT-транзисторів (Insulated Gate Bipolar Transistor — біполярних транзисторів із ізольованим затвором), що шунтовані зворотними (антипаралельними) діодами.

На рисунку 2.2 представлено принципову схему мостового перетворювача, на вхід якого через підвищувальний широтно-імпульсний перетворювач постійної напруги (DC-DC бустер) подається напруга фотоелектричної батареї.

Задля згладжування високочастотних пульсацій паралельно виходу сонячної батареї підімкнено фільтрувальний конденсатор С1 малої ємності. Вихідні затискачі активного керованого випрямляча (АКВ) інтегруються у промислову мережу змінного струму.

До вхідного ланцюга (ланки постійного струму) мосту ввімкнено буферний конденсатор С2. Для забезпечення коректної комутації та стійкої роботи системи робоча напруга на цьому конденсаторі U_{C2} повинна перевищувати амплітудне значення лінійної напруги живильної мережі:

$$U_{C2} = kE_a \quad (2.1)$$

де $k = 1,25 \dots 1,5$; E_a – амплітуда лінійної напруги мережі живлення.

Стабільна робота перетворювача відповідає умові $C2 \gg C1$. Вихідна потужність сонячної батареї залежить від рівня природного освітлення і може

змінюватися в широких межах, а виконання співвідношення (2.1) обов'язково, тому як узгоджувальна ланка між батареєю та АУВ використовується ППНП.

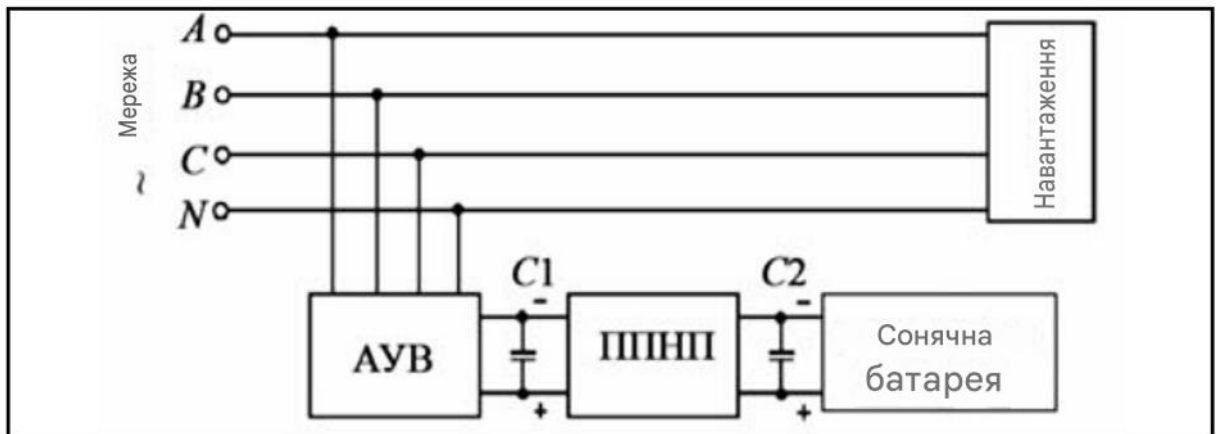


Рисунок 2.1 – Блок-схема силових кіл геліогенератора з перетворювальною системою на основі АУВ та ППНП

Керування потужністю, яка передається від сонячної електростанції до споживача в структурі перетворювальної системи згідно з рисунком 2.1, може реалізуватися двома альтернативними методами:

1. за допомогою контуру регулювання імпульсного перетворювача постійної напруги (ППН);
2. шляхом використання системи керування активного керованого випрямляча (АКВ).

Обидва підходи забезпечують ефективне функціонування обладнання в режимі відстеження точки максимальної потужності (ТМП) фотоелектричної батареї. Надалі детально розглянуто особливості застосування чотиритактного (багатофазного) широтно-імпульсного підвищувального перетворювача в автономній системі електропостачання на базі геліоустановки.

У сонячних електростанціях номінальною потужністю від 100 кВт і вище застосування підвищувального імпульсного перетворювача постійної напруги дозволяє зменшити кількість послідовно з'єднаних фотоелементів, що безпосередньо підвищує загальний ККД геліоустановки.

На рисунку 2.2 наведено електричну схему силових кіл цього перетворювача, підімкненого до виходу сонячної батареї. Стабілізована вихідна напруга такого пристрою за будь-яких умов перевищує його вхідну напругу. Цей ефект забезпечується завдяки часовому розділенню двох циклів: фази накопичення енергії в індуктивному елементі (дроселі) вхідного ланцюга та фази її подальшої передачі в ємнісний фільтр вихідного контуру.

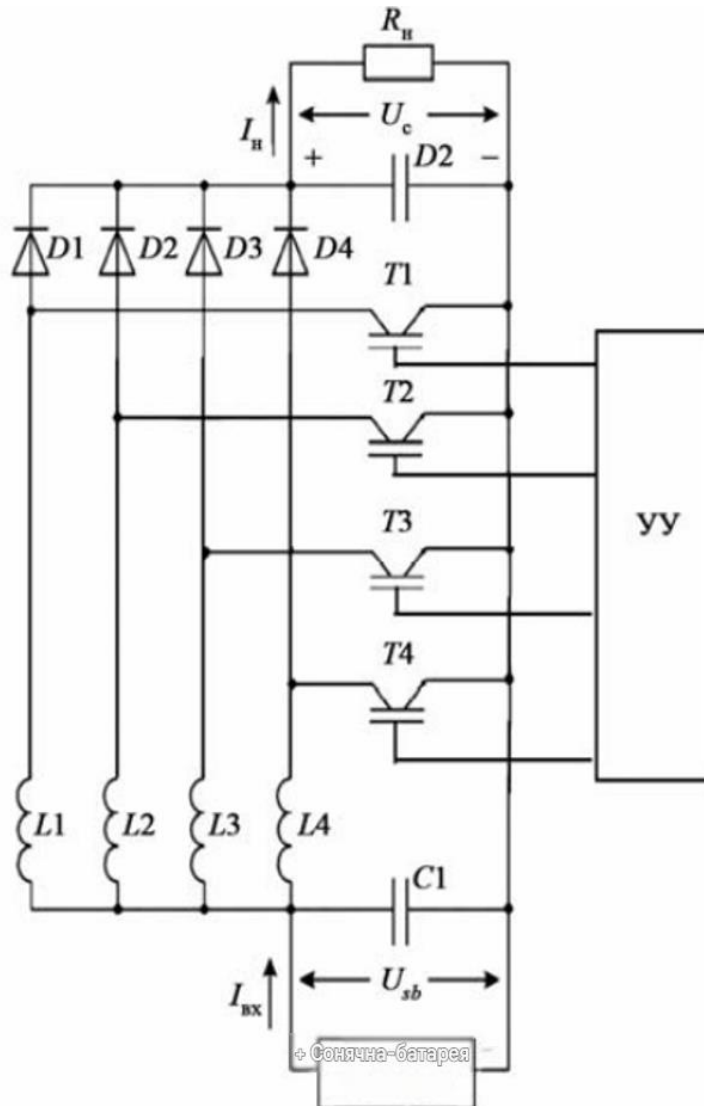


Рисунок 2.2 – Електрична схема силових кіл ППНП із сонячною батареєю

Підвищувальний перетворювач реалізовано за чотиріканальною (чотирифазною) топологією. Ця структура є паралельним з'єднанням чотирьох однофазних імпульсних комірок, кожна з яких містить вхідний індуктивний

елемент L1–L4, силовий IGBT-транзистор із ізольованим затвором T1–T4 та швидкодійний діод D1–D4.

Керування напівпровідниковими ключами здійснюється за алгоритмом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) із взаємним часовим зсувом керуючих сигналів (інтерлівінгом), що забезпечує значне зниження пульсацій сумарного вхідного струму

Керуючі сигнали від пристрою керування (ПК) надходять на затвори силових транзисторів, забезпечуючи їхню комутацію в ключовому режимі із взаємним часовим зсувом на чверть періоду $T/4$, де T — період регулювання).

На відміну від одноканальних аналогів, чотириканальний підвищувальний перетворювач має гнучкіші енергетичні характеристики.

Його застосування дозволяє стабілізувати напругу на вихідному конденсаторі C2 шляхом динамічної зміни струму навантаження відповідно до алгоритму відстеження точки максимальної потужності (ТМП). Крім того, завдяки пофазному зсуву каналів (інтерлівінгу) досягається суттєве зниження амплітуди високочастотних пульсацій вихідної напруги.

2.2 Розробка математичної моделі сонячного елемента

На рисунку 2.3 показано еквівалентну схему сонячного елемента (СЕ), що працює на активне навантаження.

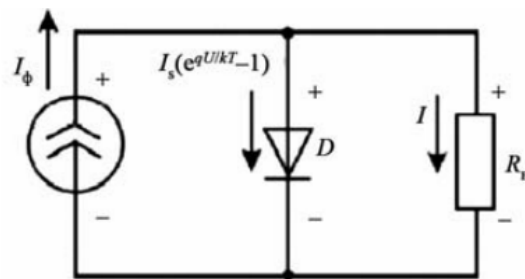


Рисунок 2.3 – Еквівалентна схема сонячного елемента

Для запобігання «ефекту гарячої плями» паралельно до навантаження (або секції фотоелементів) інтегрують шунтувальний діод SDS . Можливість відбору максимальної потужності від фотоелектричної батареї оцінюють на основі аналізу струмів, що генеруються внаслідок внутрішнього фотоефекту [6].

Під дією сонячного випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 0,2...2$ перехід структури протікає фотострум, залежність якого представлена на рисунку 2.4. Розрахунок цього струму здійснюється за такою математичною моделлю:

$$I = I_s \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) - I_{\phi} \quad (2.2)$$

де I_s – струм неосновних носіїв (струм насичення);

I_{nexp} – струм основних носіїв;

q – заряд електрона за модулем;

U – пряме зміщення переходу;

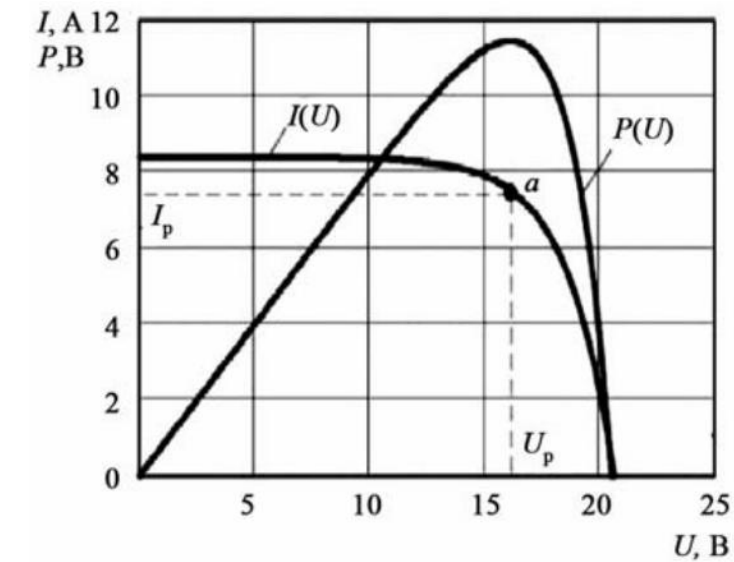
T – температура;

I_{ϕ} – первинний фотострум.

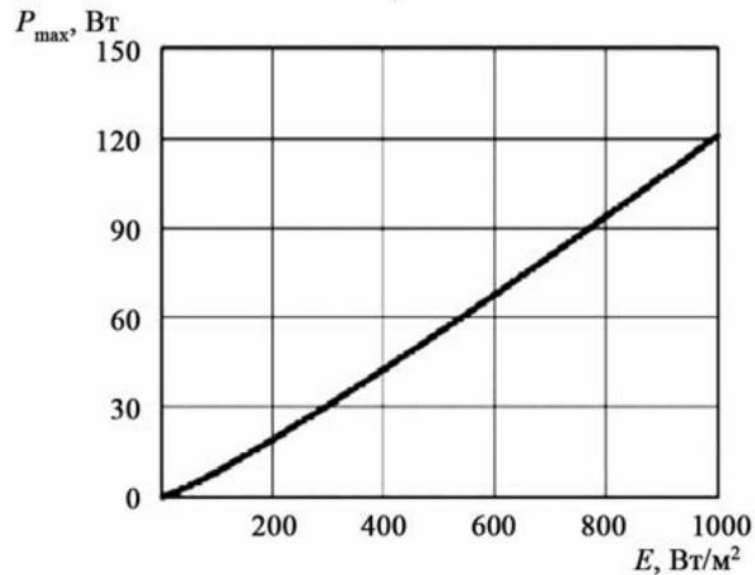
Співвідношення (2.2) визначає вольт-амперну характеристику (ВАХ) ідеального сонячного елемента. На рисунку 2.4, а представлена ВАХ сонячного модуля серії MCW на 120 Вт і напруга 12 В (крива $I(U)$) і залежність розсіюваної в навантаженні потужності від напруги модуля для рівня освітленості сонячного елемента $E=1050$ Вт/м² (крива $P(U)$).

З рисунку видно, що максимальна потужність сонячного елемента, що відбирається, знаходиться в режимі, відповідному робочій точці «а» ВАХ ($I_p = 7,06$ А; $U_p = 17$ В).

Таким чином, при освітленні р-п-переходу контактна різниця потенціалів у ньому зменшилася на величину U , інші різниці потенціалів не змінилися. В результаті на клеммах СЕ з'явилася напруга U , яка називається фото ЕРС, в опорі R - струм I .



а)



б)

Рисунок 2.4 – Характеристики сонячного модуля: а – ВАХ; б – залежність потужності, що розсіюється в навантаженні, від рівня освітленості

Таким чином, р-п-перехід функціонує як первинне джерело струму, в якому оптична енергія квантів світла безпосередньо трансформується в електричну. Якщо алгоритм системи керування забезпечує безперервне утримання робочої точки в екстремумі «а» ВАХ, то вихідна напруга підвищувального перетворювача постійної напруги (ППН) визначатиметься двома чинниками – величиною фотоструму та еквівалентним опором навантаження. При цьому зміна значення фотоструму I_{hi} , своєю чергою, є

прямо пропорційною інтенсивності освітленості (інсоляції) сонячного елемента E :

$$I_{\Phi} = \frac{E}{\alpha} \quad (2.3)$$

де α – коефіцієнт пропорційності, що залежить від типу сонячного елемента.

На рисунку 2.4, б представлено залежність максимальної генерованої потужності від рівня інсоляції для сонячного модуля марки MCW12060-12. У разі зниження рівня освітленості фотоелектричної батареї спостерігається одночасне зменшення її вихідного струму та напруги.

Якщо сонячна електростанція функціонує в режимі віддачі максимальної потужності у промислову мережу, здійснюється розрахунок оптимального струму, який визначає координати робочої точки на кривій максимальної ефективності (рис. 2.4, б). Відповідно до графічних залежностей на рисунку 2.4, а та математичних моделей (2.2) і (2.3), значення максимальної потужності сонячного елемента, що відбирається системою, становить:

Надійність функціонування підвищувального перетворювача постійної напруги (ППН) у складі перетворювальної системи геліоелектростанції визначається діапазоном можливих змін струму на його вході.

З огляду на принцип підвищення напруги, вхідний струм перетворювача за будь-яких умов перевищує струм навантаження (вихідний струм). Відношення вхідного струму до вихідного k_I , яке характеризує коефіцієнт трансформації струму силового каскаду, має перебувати в таких межах:

$$1 \leq k_I \leq \frac{I_{kT}}{I_3} \quad (2.4)$$

де I_{kT} – колекторний струм транзистора;

I_3 – струм завдання, що визначає сталість вихідної напруги U :

$$I_3 = \frac{U}{R_H} \quad (2.5)$$

де R_H – опір навантаження з урахуванням активних втрат у схемі.

Струм $I_{кТ}$ залежатиме від числа паралельно включених сонячних модулів ($n_{пар}$), отже, співвідношення (2.5) можна уявити

$$1 \leq k_I \leq \frac{n_{пар} I_p R_H}{U} \quad (2.6)$$

де $n_{пар}$ – число модулів, включених паралельно;

I_p – робочий струм модуля, при якому його вихідна потужність приймає максимально можливе значення.

Відношення вихідної напруги ППНП до вхідної (коефіцієнт посилення напруги k_U) відповідно до (2.5) знаходиться в межах

$$\frac{U}{U_p(I_{кТ})} \leq k_U \leq \frac{U}{U_p(I_s)} \quad (2.7)$$

де $U_{p(I_{кТ})}$, $U_{p(I_s)}$ – напруга сонячної батареї в режимі відбору максимальної потужності при вхідному струмі, що дорівнює колекторному струму IGBT-транзистора і струму завдання.

Напруга $U_{p(I_{кТ})}$ залежатиме від числа послідовно включених сонячних модулів $n_{пос}$. Тоді k_U змінюватиметься в межах

$$\frac{U}{n_{пос} U_p} \leq k_U \leq \frac{U}{U_p \left(\frac{U}{R_H} \right)} \quad (2.8)$$

Загальну кількість сонячних модулів електростанції можна висловити співвідношення

$$N = n_{пар} n_{пос} \quad (2.9)$$

Таким чином, сформовано математичну модель фотоелектричного елемента, яка дозволяє адекватно враховувати залежність його вихідних характеристик від рівня природної інсоляції. На основі отриманих аналітичних

співвідношень доведено, що розроблена модель демонструє найвищу ефективність за умови фіксованого позиціонування робочої точки на ВАХ, що відповідає режиму відбору максимальної потужності від сонячного елемента.

Економічна доцільність впровадження запропонованих технічних рішень також безпосередньо зумовлена характером залежності параметрів фотоелемента від інтенсивності освітленості. З огляду на це, вибір фіксованого положення робочої точки на ВАХ є рекомендованим та технічно обґрунтованим кроком для оптимізації енерговидатків системи.

Задля підвищення техніко-економічної ефективності системи пропонується інтеграція спеціалізованого пристрою автоматичного позиціонування – системи трекінгу (сонячного трекера). Цей механізм за допомогою автоматизованого електропривода здійснює безперервне відстеження траєкторії руху

Сонця, забезпечуючи постійну перпендикулярність орієнтації робочої поверхні фотоелектричної панелі до падіння сонячних променів. Результати проведених досліджень підтверджують, що впровадження керованого геліостата для стеження за сонцем дозволяє збільшити питомий річний енерговиріток з одного квадратного метра сонячної панелі в середньому на 60 кВт·год.

Остаточний вибір кроку дискретного стеження геліоустановки за Сонцем є класичною задачею умовної оптимізації. Необхідно знайти техніко-економічний компроміс між двома взаємозаперечними чинниками: мінімізацією власних потреб електроенергії на живлення автоматизованого електропривода (що вимагає збільшення інтервалу між поворотами) та деградацією вихідного фотоструму й загальної потужності системи, яка виникає через відхилення панелі від нормалі до сонячних променів під час статичних пауз.

3 РОЗРАХУНОК ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ НА ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЕНЕРГІЇ

В автономних системах електропостачання широкого розповсюдження набули відновлювані джерела енергії на базі фотоелектричних (сонячних) батарей (СБ), що зумовлено їхньою екологічною безпекою та тривалим експлуатаційним ресурсом [1–3].

Водночас низька питома потужність сучасних сонячних панелей обумовлює потребу в жорсткій економії генерованої електроенергії, що висуває високі вимоги до коефіцієнта корисної дії (ККД) силового перетворювача. Найчастіше для вирішення цієї задачі інтегрують однокаскадні перетворювачі напруги (з безпосереднім зв'язком), які характеризуються мінімальною кількістю силових компонентів.

Проте динамічні втрати в напівпровідникових структурах під час комутації транзисторів суттєво знижують загальний ККД такої системи. Комплексний аналіз характеристик прямих перетворювачів за умови їх живлення від СБ неодноразово висвітлювався у науковій літературі, зокрема у працях [4–6].

Проте спроби реалізації режимів м'якої комутації зазвичай обмежуються впровадженням додаткових пасивних демпфувальних контурів (снабберів). Вони забезпечують резонансне перемикання силового транзистора, яке супроводжується тривалими перехідними коливальними процесами. Це зумовлює штучне завищення встановленої потужності компонентів схеми, а також суттєво обмежує як граничну частоту комутації, так і робочий діапазон регулювання перетворювача [7].

З огляду на це, останнім часом як у вітчизняній, так і в зарубіжній науково-технічній літературі спостерігається стрімке зростання інтересу до мостових резонансних перетворювачів, які здатні забезпечити м'яке ввімкнення силових транзисторів (зокрема, у режимах ZVS або ZCS) без використання громіздких пасивних снабберів.

Зниження динамічних втрат повністю виправдовує збільшення кількості напівпровідникових ключів у схемі, а побудова перетворювача на основі вольтододадкової топології дозволяє досягти ще вищих показників ККД. Проте за такої структури пристрій втрачає гнучкість щодо довільного узгодження рівнів напруги вхідного джерела та навантаження.

Під час аналізу характеристик такого конвертера слід враховувати, що топологія його резонансного контуру суттєво залежить від поточного режиму експлуатації сонячної батареї, яка функціонує як джерело з яскраво вираженою нелінійною вольт-амперною характеристикою.

Зазвичай сонячна батарея експлуатується в режимі джерела струму. Застосування за таких умов класичного послідовного резонансного LC-перетворювача зумовлює потребу в широкому діапазоні регулювання при зміні параметрів навантаження, що безпосередньо визначає добротність резонансного контуру та величину частотного підлаштування.

В областях малих навантажень низькі значення добротності призводять до критично високих, практично неприпустимих зміщень робочої частоти, а режим холостого ходу для такої топології взагалі є аварійним.

3.1 Розрахунок топологічної схеми резонансного перетворювача

У резонансних перетворювачах комутація транзисторів здійснюється на частоті, близькій до власної резонансної частоти контуру. Це забезпечує синусоїдальну форму вихідного струму інвертора, який перетинає нульове значення в моменти перемикання ключів (режим ZCS), мінімізуючи динамічні втрати енергії.

При цьому спосіб підключення навантаження до резонансного контуру може варіюватися залежно від електрофізичних характеристик вхідного джерела живлення. Зокрема, під час функціонування сонячної батареї в режимі джерела струму навантаження вмикають паралельно резонансному конденсатору. Таке схемотехнічне рішення дозволяє сформувати індуктивно-

емнісний перетворювач, побудований за класичною схемою Бушера (рис. 3.1, а).

У такому перетворювачі, за умови підключення на вході джерела струму, інвертор формує на виході прямокутну напругу. На резонансній частоті в контурі забезпечується синусоїдальна форма струму, що дозволяє комутувати транзистори в режимі ZCS із мінімальними динамічними втратами. При цьому стабільність струму через резонансний конденсатор C_n безпосередньо зумовлює стабільність амплітуди напруги на навантаженні, що є характерною особливістю цієї топології.

$$U_R = \frac{\pi}{2} I_{CB} \rho \quad (3.1)$$

де $\rho = \sqrt{L_n / C_n}$ – хвильовий опір контуру.

Отже, варіюючи параметри резонансного контуру, можна реалізувати узгодження вихідного струму сонячної батареї I_{CB} із необхідним рівнем вихідної напруги без використання трансформаторних елементів.

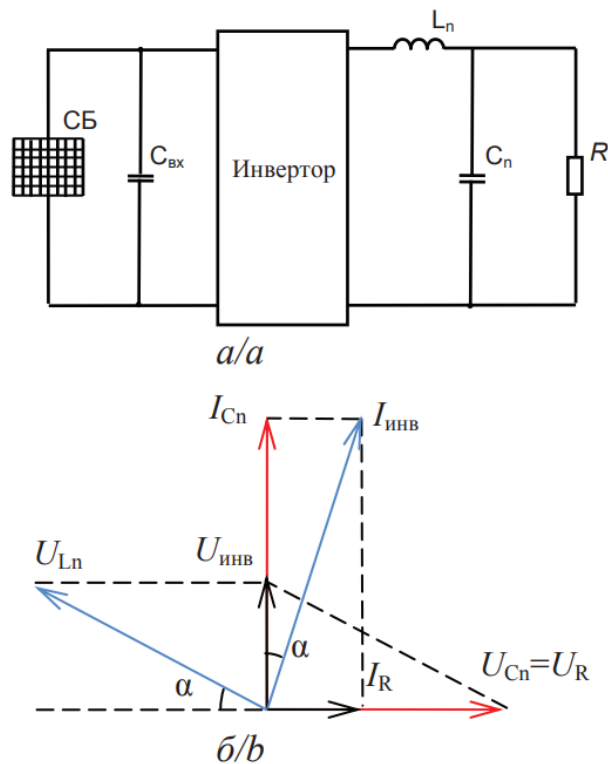


Рисунок 3.1 – Резонансний LC перетворювач: еквівалентна схема (а); векторна діаграма (б)

Така топологія дозволяє формувати вихідну напругу, що перевищує напругу сонячної батареї, забезпечуючи ефективну роботу системи навіть за умов низького опору навантаження (нижче характеристичного опору контуру).

У аналізованому перетворювачі рисунок 3.1, а – струм навантаження є різницею струмів конденсатора та інвертора, при цьому струм конденсатора стабільний по амплітуді і знаходиться у фазі з напругою, а струм інвертора відстає від напруги інвертора $U_{\text{инв}}$ на деякий кут ω , залежний

$$\alpha = \arctg \frac{\sqrt{L_n/C_n}}{R} = \arctg \frac{\rho}{R} \quad (3.2)$$

Шунтувальний вплив навантаження спричиняє розстроювання резонансного контуру, внаслідок чого при збільшенні вихідної потужності перетворювач втрачає режим резонансу. Для забезпечення стабільної роботи резонансного режиму в усьому діапазоні регулювання навантаження доцільно застосовувати топологію LCLT-перетворювача, схема якого наведена на рисунку 3.2.

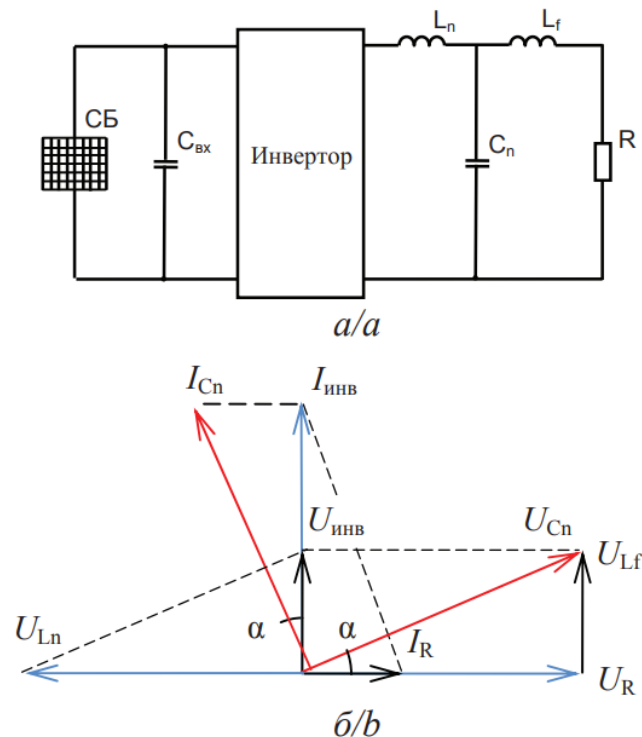


Рисунок 3.2 – Резонансний LCL перетворювач: еквівалентна схема (а), векторна діаграма (б)

Додатковий індуктивний елемент L у структурі такого контуру дозволяє компенсувати нелінійний вплив навантаження, забезпечуючи високу добротність та стабільність резонансної частоти.

За умови рівності індуктивностей $L_n=L_f$ падіння напруги на додатковому дроселі L_f дозволяє сформувати між струмом випрямляча та струмом інвертора кут $\omega/2$, що не залежить від опору навантаження. Ця умова забезпечує рівність напруги на дроселі L_n і навантаженні $U_{L_n}=U_R$ і стабільність вихідної напруги, оскільки зміна $U_{\text{инв}}$ компенсується зміною U_{L_f} . При цьому струм конденсатора поріжньому зрушений щодо струму інвертора на кут ω , який визначається навантаженням

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U_{\text{инв}}}{U_R} = \frac{I_R}{I_{\text{инв}}} = \frac{\rho}{R} \quad (3.3)$$

Для реалізації зазначених переваг резонансного перетворювача при роботі на навантаження постійного струму доцільно інтегрувати в його структуру активний випрямляч. Таке технічне рішення забезпечує рекуперацію енергії, накопиченої у вихідному фільтрі, назад у резонансний контур, що дозволяє значно знизити комутаційні втрати та підвищити енергетичну ефективність перетворювача в цілому.

3.2 Розрахунок основних параметрів активного випрямляча

Для забезпечення належного функціонування системи керуєчі імпульси транзисторів активного випрямляча мають бути фазово зсунуті відносно сигналів керування інвертором на кут ω , що відповідає фазовому зсуву між струмом інвертора та струмом навантаження. За такої умови перша гармоніка вихідного струму зустрічає опір.

$$R_{IM} = \frac{8}{\pi^2} R_H \quad (3.4)$$

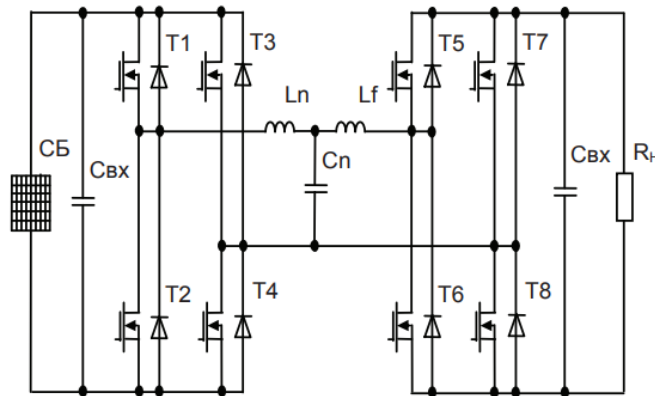
внаслідок чого на виході перетворювача формується напруга

$$U_{\text{вих}} = \frac{\pi^2}{8} I_{\text{СБ}} \rho \quad (3.5)$$

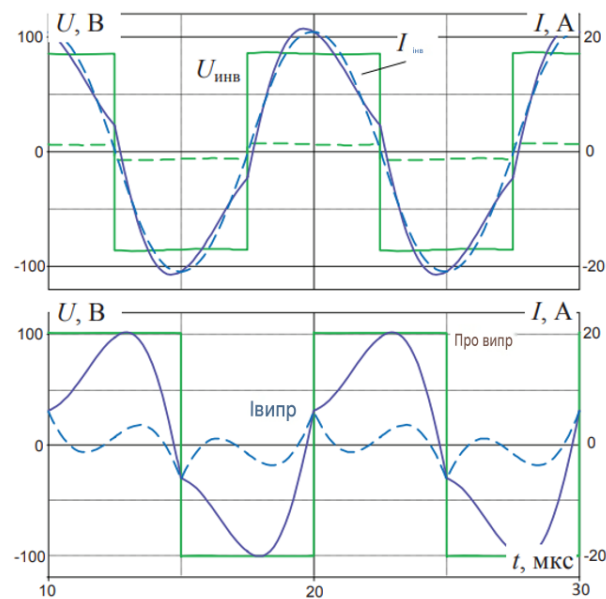
Крім того, так як перетворювач має повністю симетричну структуру, справедливе та зворотне

$$U_{\text{СБ}} = \frac{\pi^2}{8} I_i \rho \quad (3.6)$$

Забезпечення безперервного струму активного випрямляча та стабільного резонансного режиму роботи дозволяє підтримувати номінальну вихідну напругу в усьому діапазоні зміни навантаження, включно з режимом холостого ходу.



а)



б)

Рисунок 3.3 – а) Резонансний LCL-T перетворювач; б) діаграми роботи при $U_{\text{вих}}=100 \text{ В}$, $I_{\text{СБ}}=15 \text{ А}$, $f=100 \text{ кГц}$: $R_{\text{H}}=8 \text{ Ом}$; $R_{\text{H}}=100 \text{ Ом}$

У цій топології струм сонячної батареї повністю протікає через ключі інвертора, формуючи стабільний синусоїдальний струм, тоді як амплітуда напруги інвертора корелюється зі зміною навантаження. Завдяки імпедансному перетворенню, реалізованому LCLT-контуром, параметри випрямляча демонструють протилежну залежність: вихідна напруга випрямляча залишається стабільною, а його вихідний струм прямо пропорційно залежить від величини навантаження рисунок 3.3, б.

Форма струму випрямляча Івипр обумовлена напругою дроселя L_f , що має як активну (напругу випрямляча), так і реактивну (напругу конденсатора) складові.

Істотно зменшити втрати можна застосуванням вольтододаткової схеми резонансного перетворювача (рис. 3.4), яка має істотно більший ККД за рахунок перетворення лише частини потоку енергії, необхідної для формування різниці напруг $U_{вих}-U_{вх}$, хоча при цьому виключається формування вхідних напруг більше вихідного, тобто обмежується максимальне навантаження

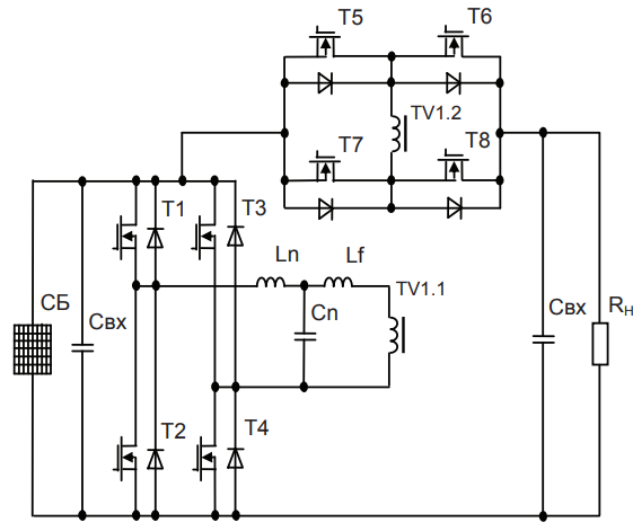
$$R_{Hmax} = \frac{\pi^2}{8} \rho \quad (3.7)$$

Враховуючи, що вираз (3) зберігає справедливість і у вольтододатковій схемі, і з урахуванням того, що в даному випадку ланка змінного струму стабілізує різницю $U_{СБ}-U_{вих}$ пропорційно різниці $U_{СБ}-U_H$

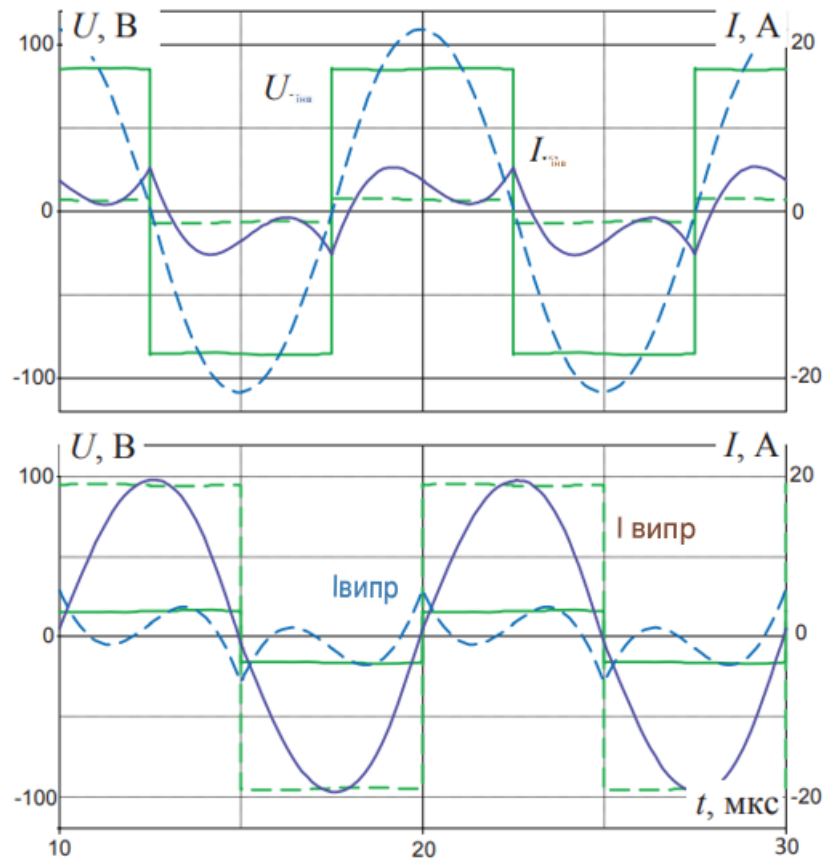
$$U_{СБ} - U_{вих} = \frac{\pi^2}{8} \rho (I_{СБ} - I_H) \quad (3.8)$$

Враховуючи, що вираз (3.4) зберігає справедливість і у вольтододатковій схемі, і з урахуванням того, що в даному випадку ланка змінного струму стабілізує різницю $U_{СБ}-U_{вих}$ пропорційно різниці $U_{СБ}-U_H$

$$U_{СБ} - U_{вих} = \frac{\pi^2}{8} \rho (I_{СБ} - I_H) \quad (3.9)$$



а)



б)

Рисунок 3.4 – а) Вольтододатковий резонансний LCL-T перетворювач; б) діаграми роботи при $U_{\text{вих}}=100$ В, $I_{\text{СБ}}=15$ А, $f=100$ кГц; $R_{\text{H}}=8$ Ом; $R_{\text{H}}=100$ Ом

Можна укласти справедливість виразу (3.4) для вольтодобавочної схеми, а, відповідно, і збереження параметричної стабілізації вихідної напруги при стабільності вхідного струму.

З топології вольтододаткової схеми видно, що струм СБ, як і вихідна напруга, ділиться між інвертором та випрямлячем, для параметрів інверторів справедливо

$$I_{\text{інв}} + I_{\text{випр}} = I_{\text{СБ}} \quad (3.10)$$

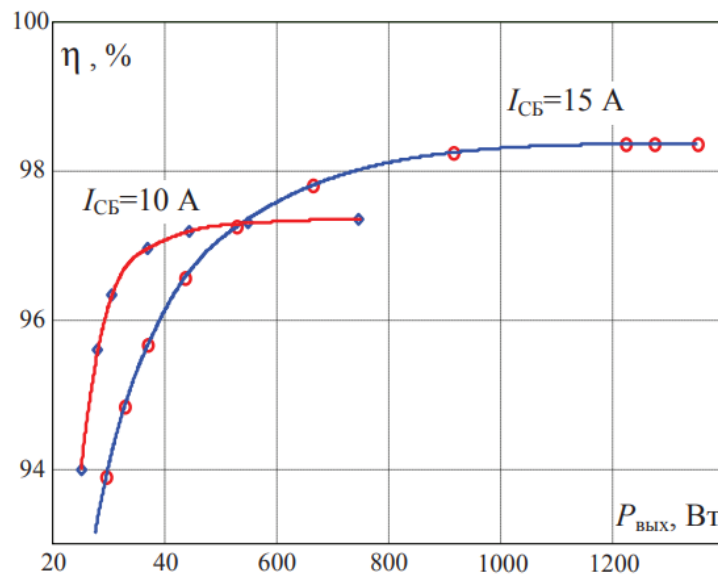
$$U_{\text{інв}} + U_{\text{випр}} = U_{\text{вих}} \quad (3.11)$$

з чого випливає, що струми інвертора та випрямляча перерозподіляються залежно від величини навантаження.

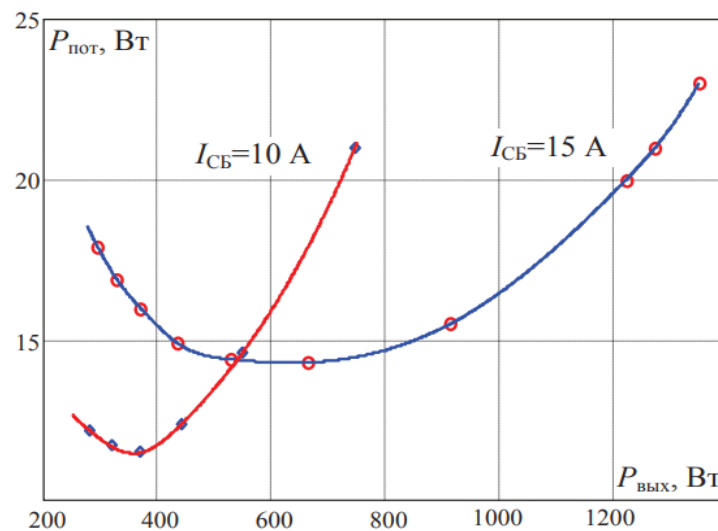
Зроблено оцінку ККД вольтододаткового резонансного LCLT перетворювача при зміні навантаження (вихідної потужності) та струму СБ, характеристики показані на рисунку 3.5. Показано, що абсолютне значення втрат має мінімум у середній частині діапазону зміни навантаження, що легко пояснюється рівномірним розподілом струму СБ між мостовими перетворювачами у цій галузі.

У крайніх точках діапазону максимальне струмове навантаження зазнає лише одного з мостів, тому втрати цих ділянках значно більше. Подані експериментальні результати підтверджують високу енергетичну ефективність вольтододаткового резонансного перетворювача, що має в номінальному режимі ККД понад 98 %.

Вольтодобавальні топологія перетворювача, що забезпечує розподіл струму СБ між мостовими перетворювачами, істотно зменшує статичні втрати транзисторів, що поряд з реалізацією м'якого перемикування дає істотне збільшення ККД до значень понад 98%.



а)



б)

Рисунок 3.5 – Залежність ККД (а), абсолютного значення активних втрат (б) резонансного LCL-T перетворювача від вихідної потужності при різних струмах СБ

Наявність двох резонансних дроселів в LCLT перетворювачі може суттєво збільшити масу, проте цей недолік мінімізується збільшенням частоти до сотень кілогерців, що є цілком реальним.

Аналіз залежності параметрів резонансного контуру в процесі регулювання показав, що їх максимальні значення, що визначають габаритну потужність всього перетворювача, відповідають номінальному режиму.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Задачі розділу

Нормативно-правову базу у сфері безпеки праці формують три наріжні камені: Кодекс законів про працю України, профільний Закон «Про охорону праці» та Закон «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування...» (який регулює виплати у разі нещасних випадків чи профзахворювань). Цю основу доповнює ціла система підзаконних актів та нормативів.

Державне регулювання у цій сфері базується на п'яти головних правилах:

- Абсолютний пріоритет людини: Життя та здоров'я працівника завжди важливіші за виробничі результати. При цьому за створення безпечного середовища на робочих місцях повністю відповідає роботодавець.
- Суворий технічний контроль: Рівень промислової безпеки підвищується завдяки постійному нагляду за станом обладнання, технологій та продукції. Крім того, держава всіляко сприяє компаніям у створенні належних умов.
- Системний та науковий підхід: Питання охорони праці вирішуються комплексно – через державні, галузеві та регіональні програми. При цьому враховуються сучасні досягнення науки, технічний прогрес та екологічні стандарти.
- Соціальні гарантії та компенсації: Держава забезпечує надійний соцзахист працівників, що включає повне відшкодування збитків у разі виробничого травматизму чи професійних захворювань.
- Рівність вимог для всього бізнесу: Стандарти та правила безпеки єдині й обов'язкові для абсолютно всіх підприємств та підприємців, незалежно від сфери їхньої діяльності чи форми власності.

4.2 Електробезпека

Лабораторне приміщення, згідно з чинними нормами [10], класифікується як зона з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом. Електрообладнання, що використовується в лабораторії, розраховане на напругу до 1000 В із струмом короткого замикання до 500 А.

З метою забезпечення електробезпеки впроваджуються такі організаційні заходи:

- Кваліфікаційні вимоги: персонал зобов'язаний пройти перевірку знань «Правил безпечної експлуатації електроустановок» та отримати допуск до роботи з обладнанням напругою до 1000 В.
- Інструктаж: перед початком роботи працівники проходять вступний інструктаж, а в подальшому — регулярні періодичні інструктажі (не рідше одного разу на квартал).

Технологічні заходи щодо забезпечення електробезпеки передбачають беззаперечне виконання таких вимог:

1. Контроль захисного занулення: Перед подачею напруги на лабораторне обладнання працівник зобов'язаний переконатися у цілісності та справності системи захисного занулення.
2. Комутація кабелів: Категорично забороняється з'єднувати або роз'єднувати кабельні роз'єми на обладнанні, що перебуває під напругою.
3. Контроль за роботою: Забороняється залишати увімкнені електроустановки без нагляду з боку персоналу.
4. Ремонт та технічне обслуговування: Будь-які ремонтні чи профілактичні роботи дозволяється виконувати виключно після повного знеструмлення установки. При цьому на комутаційному апараті (електрощиті) необхідно вивісити заборонний плакат: «НЕ ВМИКАТИ! ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ». Знімати цей плакат має право виключно той співробітник, який його встановив.

5. Вимога щодо присутності: Експлуатація лабораторних установок дозволяється лише за умови одночасного перебування в приміщенні не менше ніж двох працівників.

Одним із найбільш ефективних технічних засобів забезпечення електробезпеки є захисне занулення корпусів електроустановок. Під цим терміном розуміють навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним провідником тих металевих струмонепровідних частин обладнання, які внаслідок аварійного пошкодження ізоляції можуть опинитися під напругою.

Для реалізації цього заходу прокладають нульовий захисний дріт, підключений до глухозаземленої нейтралі джерела живлення, і з'єднують із ним металеві корпуси обладнання. Технічний механізм дії занулення полягає в трансформації випадкового замикання на корпус в однофазне коротке замикання. Це спричиняє стрімке зростання сили струму та миттєве спрацьовування апаратів максимального струмового захисту, що призводить до автоматичного знеструмлення аварійної електроустановки.

Ефективним технічним засобом підвищення електробезпеки є застосування подвійної ізоляції струмопровідних частин. Найчастіше вона реалізується шляхом покриття металевих корпусів та органів керування електрообладнання шаром діелектрика, а також використання ізолювальних рукояток.

До комплексу технічних заходів також належить регулярний контроль стану ізоляції, що передбачає щорічні випробування її електричної міцності та вимірювання опору з обов'язковим фіксуванням результатів у відповідних протоколах.

Одним із найважливіших засобів захисту є захисне заземлення. За умови аварійного замикання струмопровідних частин на корпус, який не має контакту із землею, дотик до нього є так само небезпечним, як і прямий контакт із фазним провідником. Належний рівень безпеки досягається шляхом сполучення металевого корпусу із заземлювачем, який має малий електричний опір та низький коефіцієнт дотику.

Опір приладу, що заземлює, не повинен перевищувати 4,0 Ом. Так як лабораторне приміщення повинне мати свій заземлювач, зробимо розрахунок контуру, що заземлює, згідно [10]

Визначасмо розрахунковий питомий опір ґрунту за формулою:

$$R_p = K_c \cdot \rho \quad (4.1)$$

де K_c – коефіцієнт сезонності, $K_c = 1,3$;

ρ – питомий опір ґрунту ($\rho = 150$ Ом·м).

$$R_p = 1,3 \cdot 150 = 195 \text{ Ом}$$

Визначасмо опір поодинокого вертикального заземлювача:

$$R_0 = \frac{\rho_{\text{від.}}}{2\pi d} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h+1}{4h-1} \right), \quad (4.2)$$

де R_0 - опір розтіканню струму, Ом;

l - довжина одиночного заземлювача ($l = 2,5$ м);

H - відстань від поверхні землі до середини заземлювача, м;

d - ширина поодинокого заземлювача, м.

$$d = 0,95 \cdot b \quad (4.3)$$

де b - ширина полиці кутової сталі, $b = 0,04$.

$$d = 0,95 \cdot 0,04 = 0,038 \text{ м}$$

$$H = \frac{1}{2} + h_0 \quad (4.4)$$

де h_0 – відстань від поверхні землі до початку заземлювача ($h_0 = 0,8$ м).

$$H = \frac{2,5}{2} + 0,8 = 2,25 \text{ м}$$

$$R_0 = \frac{195}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \left(\ln \frac{2 \cdot 2,5}{0,038} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,25 + 2,5}{4 \cdot 2,25 - 2,5} \right) = 64,9 \text{ Ом}$$

Розрахунок кількості паралельно з'єднаних поодиноких заземлювачів, необхідних для досягнення нормативного опору заземлення, виконується за наближеною формулою без урахування опору з'єднувальної смуги:

$$n = \frac{R_0}{R_{\bar{A}\bar{H}} \cdot \eta}, \quad (4.5)$$

де $R_{\bar{A}\bar{H}}$ – допустимий опір заземлюючого пристрою (для установок до 1000 В

$$R_{\bar{A}\bar{H}} = 4 \text{ Ом}$$

η – коефіцієнт використання групового заземлення, приймаємо $\eta = 0,55$

$$n_3 = \frac{64,9}{4 \cdot 0,55} = 30 \text{ шт.}$$

Розраховуємо довжину горизонтальної сполучної смуги за формулою:

$$l_{\bar{A}} = a \cdot (\bar{I}_{\zeta} - 1) \quad (4.6)$$

де a – відстань між вертикальними заземлювачами, $a = 2,5$ м.

Визначаємо опір сполучної смуги

$$R_n = \frac{\rho_{\delta i \zeta \delta}}{2\pi l_{\bar{A}}} \ln \frac{l_{\bar{A}}^2}{d_n \cdot H} \quad (4.7)$$

де d_n – еквівалентний діаметр смуги, м.

$$d_n = 0,95 \cdot b_n \quad (4.8)$$

де b_n – ширина смуги ($b_n = 0,15$ м)

$$d_n = 0,95 \cdot 0,15 = 0,142 \text{ Ом}$$

$$R_n = \frac{195}{2 \cdot 3,14 \cdot 72,5} \ln \frac{72,5^2}{0,142 \cdot 2,25} = 4,16 \text{ Ом}$$

Розраховуємо результуючий опір електрода, що заземлює, з урахуванням сполучної смуги, за формулою:

$$R_{\bar{A}D} = \frac{R_0 \cdot R_n}{R_0 \cdot \eta_n + R_n \cdot \eta \cdot \eta_3} \quad (4.9)$$

$$R_{\bar{A}D} = \frac{64,9 \cdot 4,16}{64,9 \cdot 0,34 + 4,16 \cdot 30 \cdot 0,55} = 2,97 \text{ Ом}$$

Опір контуру, що заземлює, складає 2,97 Ом, що менше допустимого опору пристроїв, що заземлюють, і задовольняє умовам електробезпечності.

4.3 Захист від електромагнітного та іонізуючого випромінювання

Шкідливий вплив на персонал лабораторії можуть чинити такі чинники: електромагнітні поля (ЕМП) радіочастотного діапазону 60кГц - 300ГГц, електричні поля промислової частоти 50Гц, оптичне випромінювання високої яскравості від досліджуваних джерел, пульсація світлового потоку люмінесцентних ламп 100 Гц, а також оптичне та рентгенівське випромінювання екранів персональних комп'ютерів (ПЕОМ).

Джерелами електричних полів промислової частоти є струмопровідні частини лабораторного електрообладнання, зокрема генератори, трансформатори та імпульсні установки напівперіодного або конденсаторного типу. Крім того, генератор рядкової розгортки монітора ПЕОМ є джерелом потужного радіочастотного поля у діапазоні 60 - 90 кГц, а його екран через гальмування електронів у люмінофорі генерує м'яке рентгенівське випромінювання.

Тривалий вплив електричного поля на організм людини може спричинити функціональні порушення нервової та серцево-судинної систем. Це проявляється у підвищеній стомлюваності, зниженні якості виконання робочих операцій, болях у ділянці серця, а також у змінах артеріального тиску та пульсу.

Основним способом протидії цим чинникам є захист відстанню, який передбачає максимальне віддалення персоналу від джерел випромінювання [11]. Попри наявність внутрішнього металевого екрана, монітор слід

встановлювати так, щоб тилова частина його кожуха була спрямована якомога далі від власного робочого місця та зон перебування інших співробітників. М'яке рентгенівське випромінювання екрана повністю поглинається шаром повітря завтовшки 20–30 см, тому підтримання правильної дистанції до дисплея гарантує безпеку працівника.

Задля зниження електромагнітного навантаження на персонал застосовують метод екранування джерел за допомогою металевих конструкцій, що є стандартною інженерною практикою при експлуатації потужного радіочастотного обладнання. Паралельно з цим, для мінімізації негативного впливу оптичного випромінювання моніторів на органи зору, впроваджують організаційний захід — «захист часом», який обмежує тривалість безперервної роботи користувача.

Якщо виробничий або дослідницький процес безпосередньо пов'язаний із розробкою чи експлуатацією високоінтенсивних оптичних джерел, безпека працівників забезпечується засобами індивідуального захисту, а саме — окулярами зі спектрозональними або нейтральними світлофільтрами.

Окрему увагу при облаштуванні робочої зони слід приділити демпфуванню світлових пульсацій частотою 100 Гц, які генеруються загальною системою люмінесцентного освітлення. Цю проблему технічно вирішують шляхом інтеграції локального переносного підсвічування на базі лампам розжарювання відповідної потужності, що дозволяє вирівняти світловий потік.

4.4 Пожежна безпека

За рівнем вибухо- та пожежної небезпеки лабораторне приміщення, оснащене електрообладнанням, класифікується як об'єкт категорії Д. Основними чинниками, що можуть спровокувати займання на території лабораторії, є коротке замикання (із подальшим спалахуванням ізоляції) та

критичне нагрівання контактних з'єднань. Додатковим ризиком виникнення пожежі є порушення персоналом вимог пожежної безпеки [11].

До комплексу організаційних заходів із пожежної безпеки належать навчання персоналу, розробка й упровадження відповідних нормативів, створення профільних інструкцій, а також використання засобів наочної агітації.

З метою оперативного інформування рятувальних служб про займання приміщення лабораторії обов'язково обладнується системою пожежної сигналізації. Крім того, весь штат співробітників має періодично проходити повторні протипожежні інструктажі.

З-поміж працівників лабораторії формують спеціальну протипожежну ланку. Її члени проходять обов'язкову підготовку, яка складається з відповідних інструктажів та занять із пожежно-технічного мінімуму.

Відповідальність за протипожежний стан приміщення лабораторії покладається на командира цієї ланки. До його обов'язків належить:

- контроль за дотриманням установленого протипожежного режиму;
- моніторинг справності устаткування та негайне вжиття заходів щодо усунення виявлених дефектів, які можуть спричинити займання;
- забезпечення прибирання робочих місць і приміщення, а також обов'язкове знеструмлення електромережі (за винятком чергового освітлення) після завершення зміни;
- підтримання постійної готовності засобів пожежогасіння, зв'язку та сигналізації;
- контроль за дотриманням заборони на зберігання в лабораторії вибухо- й пожежонебезпечних, а також токсичних чи отруйних речовин;
- негайний виклик пожежно-рятувальної служби в разі виникнення загоряння.

У разі займання електрообладнання першочерговою дією є його обов'язкове знеструмлення. Лише після відключення напруги дозволяється розпочати ліквідацію вогню за допомогою вуглекислотного чи порошкового

вогнегасника або сухого піску. При цьому в лабораторії має бути в наявності щонайменше два таких вогнегасники. Використання хімічних пінних вогнегасників (зокрема типу ОХП) суворо заборонено [11].

ВИСНОВКИ

В бакалаврській кваліфікаційній роботі було виконано вдосконалення перетворювачів автономних систем електроживлення від відновлювальних джерел енергії.

В першій частині виконано аналіз основних вимог, що висуваються до перетворювачів енергії від сонячних батарей; можливість підвищення якості регулювання потужності в системі електропостачання із сонячною батареєю; аналіз роботи звичайного двотактного джерела безперебійного живлення змінного струму.

В другій частині виконано розробка блок-схеми силових кіл перетворювачів, від відновлювальних джерел енергії; використання монокристалічних кремнієвих фотоелементів як відновлювальних джерел енергії; розробка математичної моделі сонячного елемента.

В третій частині виконано розрахунок перетворювача для автономних систем електроживлення на відновлюваних джерелах енергії; розрахунок топологічної схеми резонансного перетворювача; розрахунок основних параметрів активного випрямляча.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі були розглянуті питання з охорони праці, де розроблені організаційні та технічні заходи зі створенням безпечних та нешкідливих умов праці на об'єкті.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Мещеряков В. С., Глухов А. А. Основні напрями забезпечення надійності систем електропостачання / XIX ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ «СТАЛИЙ РОЗВИТОК МІСТ: ПОСТВОЄННИЙ ПЕРІОД» 18 квітня 2026 р м. Харків.
2. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Клепиков В. Б., та ін. за ред. Поповича М. Г., Лозинського О. Ю. *Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи* : навч. посібник Київ : Либідь, 2005. 680с.
3. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів. *навч. посібник* Львів: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка», 2004. 404с.
4. Попович М. Г., Артименко Л. Ф., Бурмістенков О. П. та ін. Електричні машини та електропривод побутової техніки: *Підручник*. За ред. Д. Б. Головка, М. Г. Поповича. – 2-ге вид., стеретик. К.: Либідь, 2004. 352с.
5. Буртний В. В., Карплюк Л. Ф., Панченко Б. Я.. Тиристорний електропривід постійного струму: *Навч. посібник* Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2007. 128с.
6. Барало О. В., Самойленко П. Г., Гранат С. Є., Ковальов В. О. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: *Навчальний посібник* К.: Аграрна освіта, 2010. 557с.
7. Колісник М. П., Шевченко Д. Ф., Мелашич В. В. Основні розробки, виробництва, монтажу, випробувань та обстежень підйомно-транспортних машин. *Навчальний посібник* Дніпропетровськ: *Пороги*, 2007. 193с.
8. A New Range Of Medium Voltage Multilevel Inverter Drives With Floating Capacitor Technology. Beinhold Georg // EPE 2001 – Graz. – P. 42–44.
9. Dynamic Average-Value Modeling of a Four-Level Drive System / Corzine Keith // IEEE Transactions On Power Electronics. – 2003. – № 18. – P.

10. Закон України «Про охорону праці». – К., 2016.

11. Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності». – К., 2001.