

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: **Розробка автономної системи електропостачання з прогнозуючим алгоритмом керування**

Виконала: студентка 4 курсу, групи ЕТс-41
спеціальності 141

електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

_____ Турдай М.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник _____ Наконечний М.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____ Вакуленко О. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____ Тарасенко М. Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(підпис) (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

Тарасенко М. Г.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« 08 » лютого 2022 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

студенту Турдай Михайлу Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка автономної системи електропостачання з прогнозуючим алгоритмом керування

Керівник роботи ... Наконечний Мирослав Степанович, к.т.н.

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

Затверджені наказом ректора від « 1 » лютого 2022 року № 4/7-76

2. Термін подання студентом завершеної роботи 18 червня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи _____

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

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунковий розділ

4. Безпека життєдіяльності та основи охорони праці

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	Гурик О. Я., к.т.н., доцент кафедри МТ		
Нормоконтроль	Вакуленко О. О., ст. викладач кафедри ЕІ		

7. Дата видачі завдання 08 лютого 2022 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	26.02.2021	
2	Аналітичний розділ	31.03.2021	
3	Проектно-конструкторський розділ	16.04.2021	
4	Розрахунковий розділ	30.04.2021	
5	Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	14.05.2021	
6	Висновки	31.05.2021	
7	Оформлення пояснювальної записки	03.06.2021	
8	Оформлення графічної частини	14.06.2021	

Студент

(підпис)

Турдай М.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Наконечний М.С.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс–41. - Т. : ТНТУ, 2022.

Стор. 57; рис.50; табл. 6; креслень __; джерел 20; додатків _.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Розробка автономної системи електропостачання з прогнозуючим алгоритмом керування».

Мета кваліфікаційної роботи полягає у забезпеченні необхідної якості вихідної напруги автономної системи електропостачання на основі алгоритмів керування

Проведено дослідження режимів роботи напівпровідникової трифазної СЕС на базі напівпровідникового перетворювача (інвертора), що реалізує алгоритм прогнозуючого керування. Проведені дослідження показали реалізованість, ефективність та перспективність застосування вищезазначеного алгоритму для досягнення необхідної якості вихідної напруги. В результаті виконаних у роботі досліджень.

У пакеті Matlab Simulink розроблена імітаційна модель СЕС при керуванні автономним інвертором з нульовим проводом на основі трьох методів керування: з ПР-регулятором, ПІД-регулятором та з прогнозуючою моделлю.

Проведено порівняльні дослідження СЕС з прогнозуючим керуванням із СЕС, що функціонують на основі алгоритмів пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) та пропорційно-резонансного (ПР)-регулювань.

Розроблено алгоритми аварійного захисту напівпровідникової СЕС з прогнозуючим керуванням струму навантаження.

Ключові слова: сонячна електростанція, ПР-регулятор, ПІД-регулятор комп'ютерне моделювання.

ЗМІСТ

Реферат	3
Вступ	6
1 Аналітичний розділ	8
1.1 Micro Grid як концепція малої розподіленої енергетики	8
1.1.1. Micro Grid постійного струму	9
1.1.2. Micro Grid змінного струму	10
1.1.3. Гібридні Micro Grid	10
1.2 Структури напівпровідникових перетворювачів у СЕС	11
1.2.1 Двоступінчасті системи перетворення	11
1.2.1. Одноступінчасті системи перетворення	12
1.3 Топології трифазних АІН у СЕС	13
1.3.1. Проста топологія трифазного АІН	13
1.3.2 Топологія трифазного АІН із середньою точкою конденсатора	14
в ланцюзі живлення	
1.3.3 Топологія трифазного АІН з нульовим проводом	15
1.3.4 Топологія на основі трьох окремих однофазних інверторів	16
1.4 Висноки до розділу	18
2 Проектно–конструкторський розділ	19
2.1 Порівняльний аналіз алгоритмів керування СЕС	19
2.2 Вибір алгоритму лінійного керування	21
2.3 Статичний режим роботи СЕС	25
2.4 Динамічний режим роботи СЕС	29
2.5 Аналіз чутливості керування	30
2.6 Висновки до розділу	32
3 Розрахунковий розділ	34
3.1 Оптимізація алгоритму КПМ	34
3.2 Експериментальні результати проведених моделювань	36
3.2.1 Статичний режим	39
3.2.2 Динамічний режим	44
3.2.3 Аварійні режими	45

3.3 Висновки до розділу	48
4 Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	49
4.1 Техніка безпеки при експлуатації електрообладнання та електромереж	49
4.2 Дослідження стійкості роботи у надзвичайних ситуаціях підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі	51
Загальні висновки	55
Перелік посилань	56

ВСТУП

Актуальність роботи. На сьогоднішній день можна констатувати, що світова енергетична система увійшла в новий етап фундаментальної трансформації. Загалом цей комплекс змін називають «Енергетичним переходом», сформованим під впливом змін у енергополітиці та розвитку нових технологій, що передбачає широке використання відновлюваних джерел енергії при витісненні викопних видів палива.

Відновлювані джерела енергії, об'єднані в мікромережі (microgrid) можуть стати економічно ефективним способом забезпечити доступ до надійного та недорогого енергопостачання тим, хто зараз живе без електрики, причому такі системи електропостачання (СЕС) можуть працювати як автономно, і разом із основними електричними мережами.

Автономні СЕС, як правило, працюють в умовах обмеження потужності вхідного джерела, а також «непередбачуваності» навантажень, що визначає їхній випадковий характер, як за величиною активної потужності, так і за характером - навантаження можуть бути одно- або трифазними, збалансованими (симетричними) або незбалансованими, лінійними чи нелінійними. Несиметрія та гармонічні спотворення напруги можуть викликати серйозні проблеми з обладнанням, такі як вібрація, перенапруга, перегрів тощо.

Системи автономного електропостачання зазвичай складаються з джерела живлення, навантажень, силових електронних пристроїв та систем зберігання енергії. Автономна СЕС поводить як керований об'єкт.

Основними силовими електронними пристроями в СЕС є інвертори, які використовуються як інтерфейси для підключення джерела живлення до навантажень змінного струму. Основною функцією інверторів є передача та керування потужністю. Крім того, шляхом правильного керування інверторами можуть бути вирішені проблеми дисбалансу напруги, а також компенсації вищих гармонік.

Значний внесок у розвиток теоретичних та експериментальних досліджень систем електропостачання, у тому числі автономних, на основі напівпровідникових перетворювальних пристроїв зробили наступні вчені: С.А.

Харитонов, Г.С. Зінов'єв, Г.С. Мицик, А.А. Єфімов, І.А. Баховцев, Шрейнер Р.Т., Г.В. Грабовецький, Б.В. Лукутін, І.І. Лукін, Б.П. Соустін, В.Є. Тонкаль, В.А. Цішевський, Т.А. ЛЗПо, Bimal K. Bose, Marvin J. Fisher, Kazmierkowski M., R. Zhang, ME Fraser, CD Manning, K. Zhang, Y. Kang, J. Xiong та ін.

При великій поширеності напівпровідникових СЕС в енергетиці промислових та автономних об'єктів застосування нових схемотехнічних та алгоритмічних рішень, що дозволяють підвищити якість їхньої роботи, є актуальним завданням.

Метою роботи є забезпечення необхідної якості вихідної напруги автономної системи електропостачання на основі алгоритмів керування.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

Вивчити та проаналізувати особливості застосування та побудови автономних напівпровідникових СЕС при роботі на різні види навантажень та у складі автономних мереж, зокрема, microgrid.

Провести порівняльні дослідження СЕС з прогнозуючим керуванням СЕС, що функціонують на основі алгоритмів пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) та пропорційно-резонансного (ПР)-регулювання.

Розробити алгоритми аварійного захисту напівпровідникової СЕС з прогнозуючим керуванням струму навантаження.

На підтвердження теоретичних досліджень провести експериментальну перевірку алгоритмів прогнозуючого керування.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Micro Grid як концепція малої розподіленої енергетики.

Концепція Micro Grid передбачає створення на певних територіях потенційно автономної енергомережевої структури, що містить власні джерела електроенергії та здатної вирішити задачу електропостачання споживачів як самостійно (автономно), так і при максимумі пікових навантажень, коли центральна мережа не в змозі забезпечити споживач якісною електроенергією. Концепція Micro Grid також передбачає використання відновлюваних джерел енергії, які з кожним роком, у зв'язку з екологічною ситуацією, що погіршується, стають все більш і більш затребуваними. Саме використання поновлюваних джерел дозволяє вирішити завдання енергоефективності СЕС.

Micro Grid включає набір генеруючих джерел електроенергії. Генеруючі джерела можуть бути представлені комбінацією традиційних джерел, що працюють на дизельному паливі (дизель-генератори) або газі (газопоршневі двигуни), малими гідроелектростанціями, а також вітроустановками та сонячними станціями.

Певної межі потужності для Micro Grid не існує. Приміром, компанія АВВ встановила собі кордон за потужністю близько 20 МВт. Існує і концепція NanoGrid, мережі якої характеризуються потужностями до 50 кВт. Визначальним у концепції Micro Grid (NanoGrid) є використання передових технологій у галузі силової електроніки, мікропроцесорної техніки та електротехнічного матеріалознавства. У цьому сенсі у складі Micro Grid можуть бути пристрої передачі електроенергії на постійному або змінному струмі, можливе застосування частотно-регульованих електроприводів, ефективних низьковитратних силових трансформаторів, освітлювачів на LED-технологіях і т. д. Центральним енергоперетворювальним пристроєм Micro Grid є автономний інвертор напруги - АІН (струму - АІС) як ланка,

Класифікація конфігурацій СЕС Micro Grid може бути виконана відповідно до методу, що використовується для передачі та розподілу потужності [11]. Ця

класифікація складається з Micro Grid постійного струму, Micro Grid змінного струму та гібридних Micro Grid.

1.1.1. Micro Grid постійного струму

Мікрогриди постійного струму широко застосовують у телекомунікаційних системах, електромобілях тощо. Крім того, інтенсивне використання електронних навантажень в офісних будівлях та комерційних об'єктах та швидке зростання джерел живлення постійного струму, таких як фотоелектричні та паливні елементи, роблять мікрогриди постійного струму привабливим мережевим рішенням. На рис. 1.1 зображено типову структуру мікрогриду постійного струму на основі пристроїв силової електроніки - DC-DC-перетворювачів, випрямлячів та автономних інверторів напруги.

Контролер, який здійснює стеження (з формуванням необхідних команд) за режимами споживання навантажень та окремих перетворювачів, зарядом акумуляторної батареї від синхронного вітрогенератора PMSG або від сонячної панелі PV, блокування аварійних режимів СЕС умовно не показано.

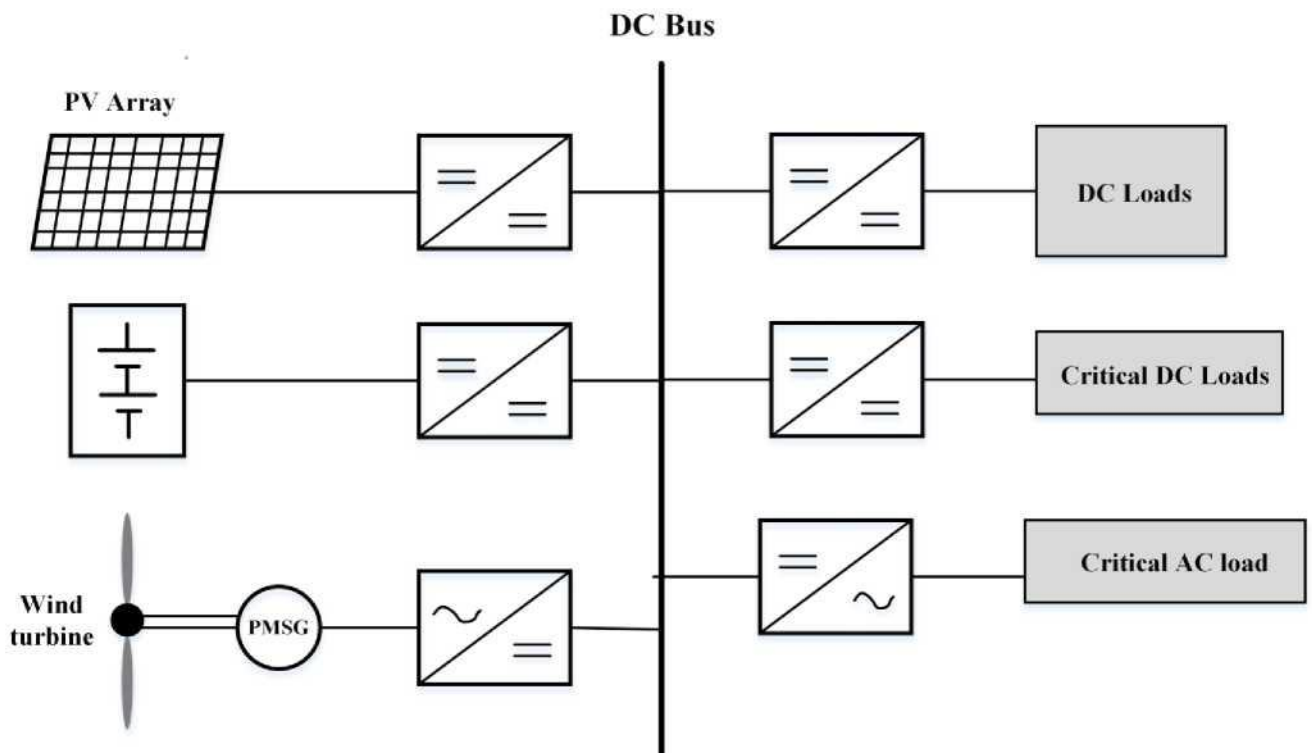


Рисунок 1.1. Структура Micro Grid постійного струму

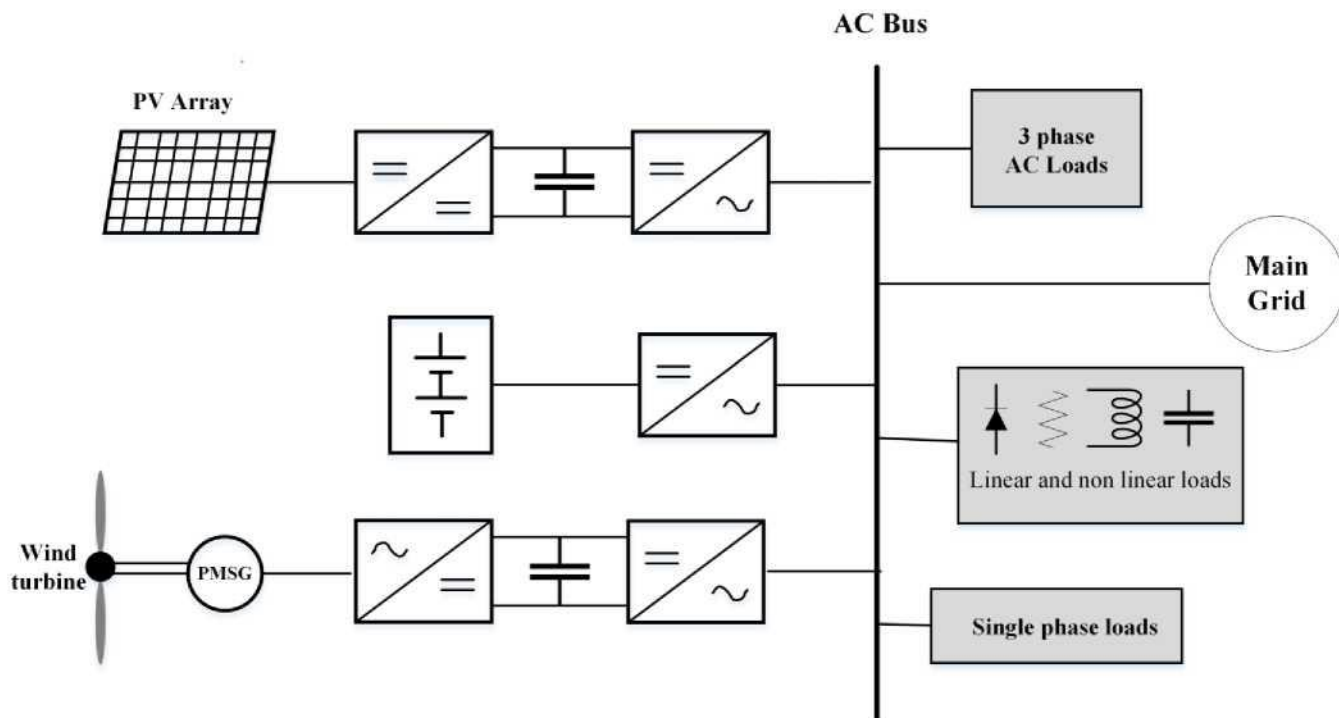


Рисунок 1.2. Структура Micro Grid змінного струму

1.1.2. Micro Grid змінного струму

На рис. 1.2 показано типова конфігурація мікрогрідів змінного струму на основі пристроїв силової електроніки. У цій конфігурації джерела живлення безпосередньо підключаються до шини змінного струму та навантаження через окремі перетворювачі [12] в один або два етапи, як буде обговорюватися в наступному розділі. Якщо який-небудь з перетворювачів виходить з ладу через недостатність електроенергії в каналі, мікрогрід може забезпечити необхідну кількість енергії з джерел, що залишилися [13]. Однак ця система має недолік у дорогих інвестиціях і вимагає складного алгоритму керування для перетворювачів для регулювання потужності, напруги (струму), що формуються у загальній шині змінного струму. Так, наприклад, потрібна система жорсткої синхронізації автономних інверторів напруги по фазі та величині миттєвих напруг.

1.1.3. Гібридні Micro Grid

У гібридних мікрогридах [14, 15] загальна шина постійного струму збирає регульовану потужність від різних джерел живлення, забезпечує навантаження постійного струму та підтримує постійну напругу постійного струму на входному терміналі автономного інвертора напруги. Інвертор використовується для підключення загальної шини постійного струму до навантажень змінного струму,

як показано на рис. 1.3. Контролер, який здійснює стеження (з формуванням необхідних команд) за режимами споживання навантажень та окремих перетворювачів, зарядом акумуляторної батареї від синхронного вітрогенератора PMSG або від сонячної панелі PV, блокування аварійних режимів СЕС умовно не показано. На відміну від попередньої схеми на автономний інвертор, розрахований в даному випадку на повну потужність навантаження,

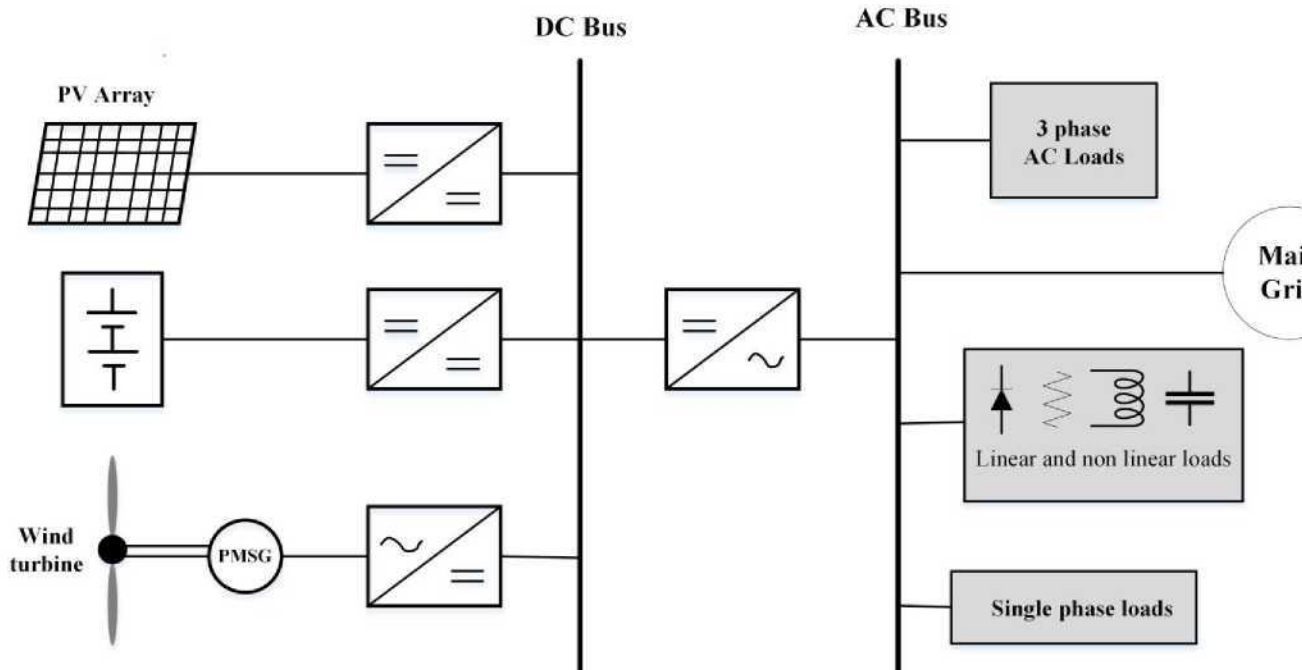


Рисунок 1.3. Структура гібридного Micro Grid

1.2 Структури напівпровідникових перетворювачів у СЕС

Структури зв'язків джерел живлення у СЕС визначаються типами первинних енергоресурсів, вимогами навантаження та структурами мікрогридів [16]. Топологія напівпровідникових перетворювачів може бути поділена на дві категорії залежно від кількості щаблів перетворення енергії.

1.2.1 Двоступінчасті системи перетворення

Двоступінчаста система перетворення енергії є найпоширенішою конфігурацією для блоків живлення. На рис. 1.4 показані дві типові структури двоступінчастої системи перетворення для фотоелектричних систем та вітрових турбін, відповідно. У загальному випадку двоступінчаста система перетворення складається з першого ступеня перетворювача постійного струму з вихідною

напругою постійного струму або випрямляча для цих джерел енергії з вихідною напругою змінного струму, другий ступінь - інвертор для навантаження змінного струму або перетворювач постійного струму для постійного навантаження струму. Ця конфігурація має дві окремі системи керування: керування першим щаблем ставить за мету вилучення максимальної потужності з первинного джерела живлення; система керування другою щаблем забезпечує якісне перетворення постійної напруги змінне з необхідною амплітудою, частотою, коефіцієнтом гармонійних спотворень в умовах характеру заданого навантаження.

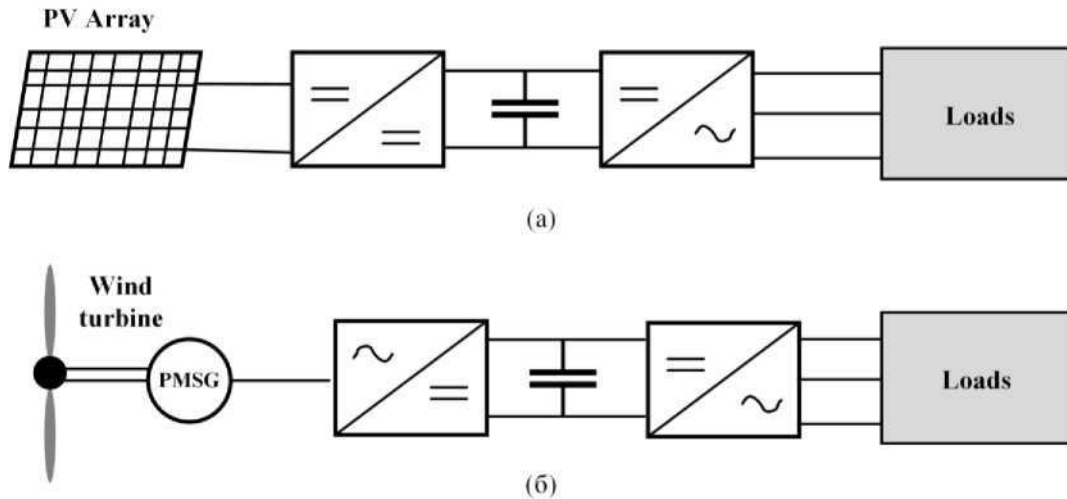


Рисунок 1.4. Дві структури двоступінчастих систем перетворення (а) для фотоелектричної системи (б) для вітротурбінної системи

1.2.2 Одноступінчасті системи перетворення

На рис. 1.5 показана базова конфігурація одноступінчастої системи перетворення для блоків живлення, які створюють напругу постійного струму. Ця конфігурація забезпечує переваги високої ефективності, невеликого розміру та ваги, а також зниження вартості. Тим не менш, для цього потрібна складна система керування для виконання функції двоступінчастої конфігурації: як і в попередньому прикладі, система керування повинна забезпечити якісне перетворення постійної напруги на змінне з необхідною амплітудою, частотою, коефіцієнтом гармонічних спотворень в умовах характеру заданого навантаження, а також максимального відбіру потужності від сонячної панелі PV.

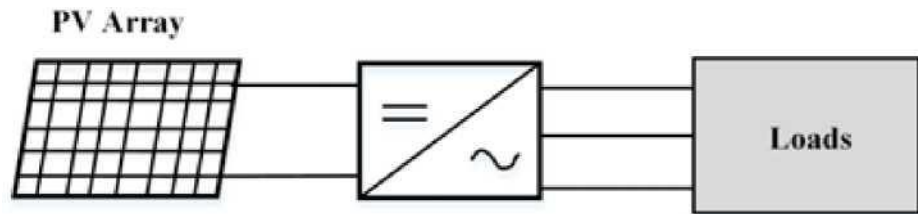


Рисунок 1.5. Структура одноступінчастої системи перетворення для фотоелектричної системи

1.3 Топології трифазних АІН у СЕС

1.3.1. Проста топологія трифазного АІН

На рис. 1.6 зображено трипровідну топологію трифазного АІН з вихідним фільтром [17]. Робота ключів АІН передбачається як широтноімпульсною модуляції вихідної напруги з наступною фільтрацією вищих гармонійних у вихідному LC-фільтрі. Головною особливістю такої топології є нездатність її роботи на несиметричну, а, тим більше, нелінійне навантаження по-перше, через відсутність четвертого (нульового) дроту, а, по-друге, великою складністю організації системи керування зниження незручностей від цього недоліку. В якості альтернативи можна використовувати цю топологію, але з Л-У трансформатором [18,19] або зигзагоподібним трансформатором [20], який є важким і дорогим і, отже, небажаний в багатьох додатках.

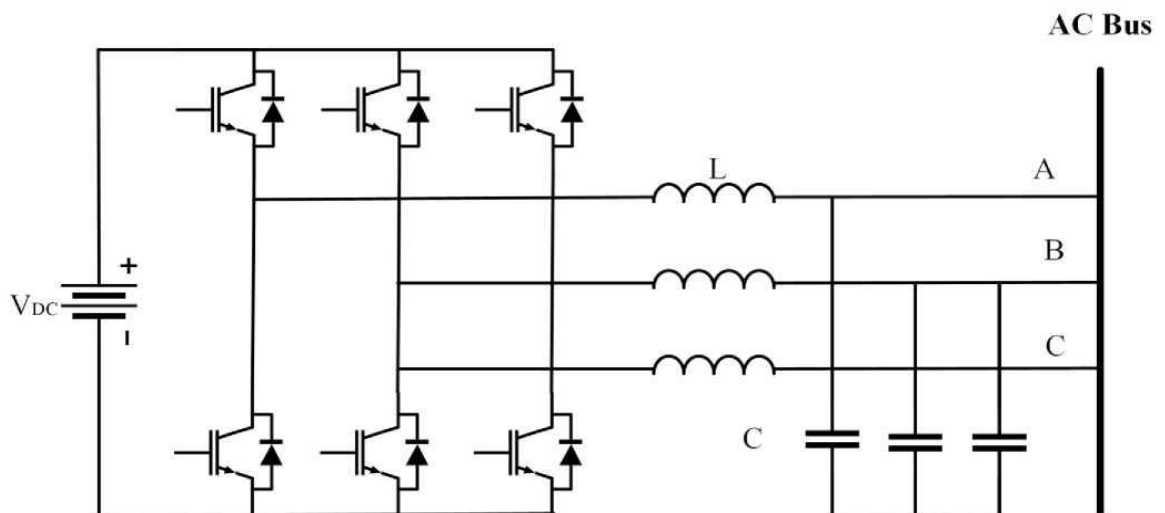


Рисунок 1.6. Топологія трифазного АІН із вхідним фільтром

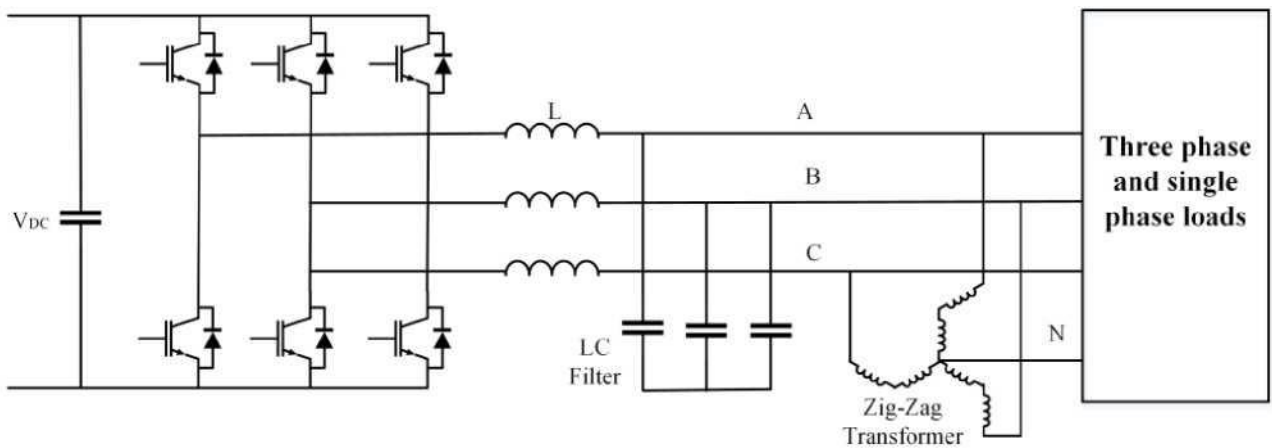


Рисунок 1.7. Топологія трифазного АІН із «зигзагоподібним» трансформатором

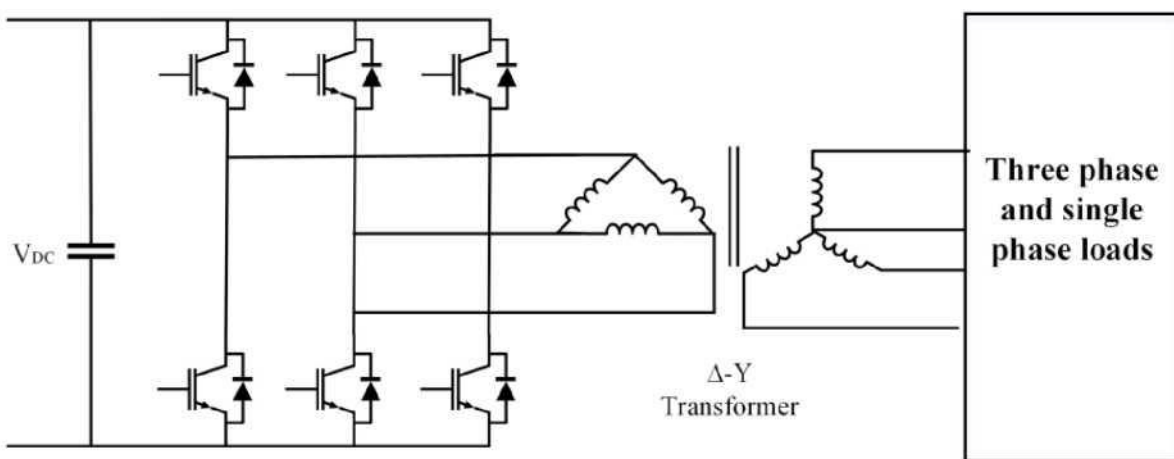


Рисунок 1.8. Топологія трифазного АІН із трансформатором АУ

1.3.2 Топологія трифазного АІН із середньою точкою конденсатора в ланцюзі живлення

Топологія із середньою точкою конденсатора в ланцюзі живлення, показана на рис. 1.9, є найпростішою топологією АІН з нульовим дротом та з найменшою кількістю ключів. У цій топології нульовий провід підключається до середньої точки розділених конденсаторів постійного струму. Принципово, ця топологія може бути змодельована як три незалежні однофазні напівмостові інвертори. Максимально досягне пікове значення фазної напруги на виході АІН у цьому випадку становить половину напруги живлення шини постійного струму ($V_{dc}/2$). Таким чином, для того, щоб отримати 220 на фазу потрібна велика напруга шини постійного струму (зазвичай 700 В). Ця схема потребує дорогих і великих

конденсаторів задля досягнення рівного розподілу напруги між розщепленими конденсаторами [20].

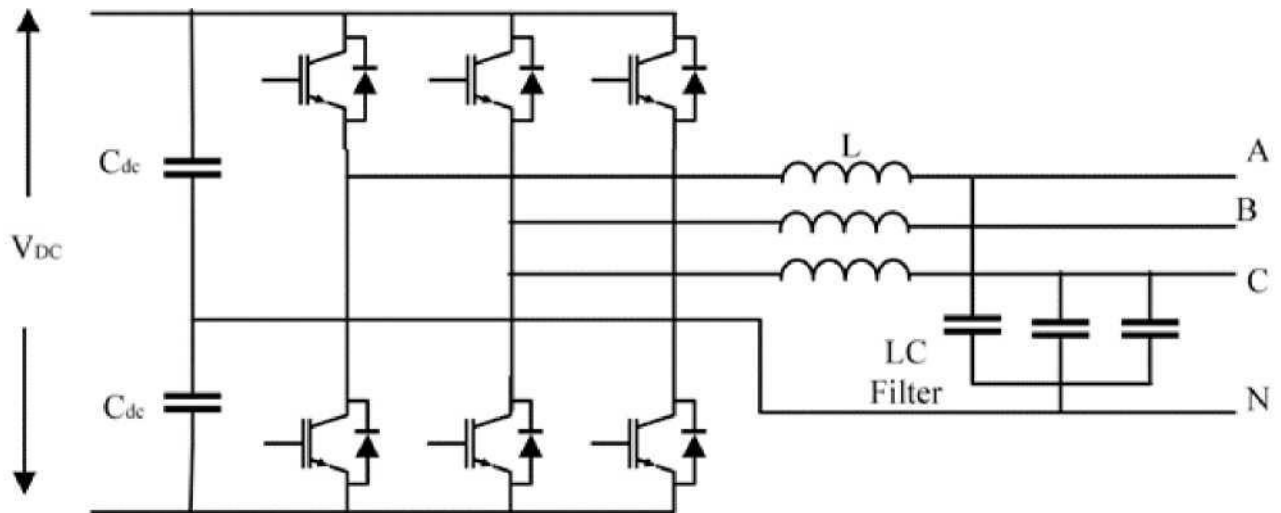


Рисунок 1.9. Топологія із середньою точкою конденсатора

1.3.3 Топологія трифазного АІН з нульовим проводом

Серед розробників СЕС зростає інтерес до використання трифазних інверторів з нульовим проводом через їхню здатність ефективно обробляти незбалансовані навантаження у чотирьохпровідних автономних системах. У цій топології нейтральний провід підключений до штучно створеної середньої точки у четвертій стійці (рисунок 1.10). Конденсатори шини постійного струму використовуються тільки для усунення пульсації на шині постійного струму (середня точка постійного шини не використовується, тому в цьому перетворювачі відсутня проблема дисбалансу напруги конденсатора). Таким чином, конденсатори, що використовуються, шини постійного струму відносно малі. Максимально досягне пікове значення вихідної фазової напруги вище, ніж значення АІН із середньою точкою конденсатора ($V_{dc} / \sqrt{3} = 0,577$ порівняно з $0,5 V_{dc}$). Тому вимога рівня напруги шини постійного струму стає нижчою, а втрати на перемикання зменшуються, що призводить до підвищення ефективності. Наявність двох додаткових транзисторних ключів призводять до ускладнення алгоритму керування, що у принципі можна з урахуванням сучасного рівня розвитку мікропроцесорної техніки.

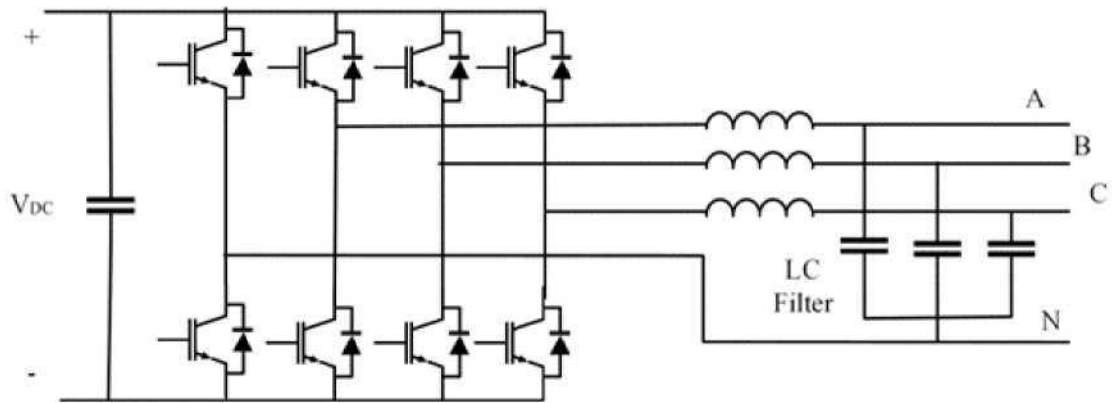


Рисунок 1.10. Топологія трифазного АІН із нульовим проводом

1.3.4 Топологія на основі трьох окремих однофазних інверторів

Цей тип перетворювача складається з трьох однофазних інверторів, які підключені до навантажень через розділовий трансформатор, як показано на рисунку 1.11. У порівнянні з іншими топологіями ця топологія має такі переваги, як низька вимога напруги постійного струму для заданої вихідної напруги, що вдвічі менше, ніж у інвертора із середньою точкою конденсатора.

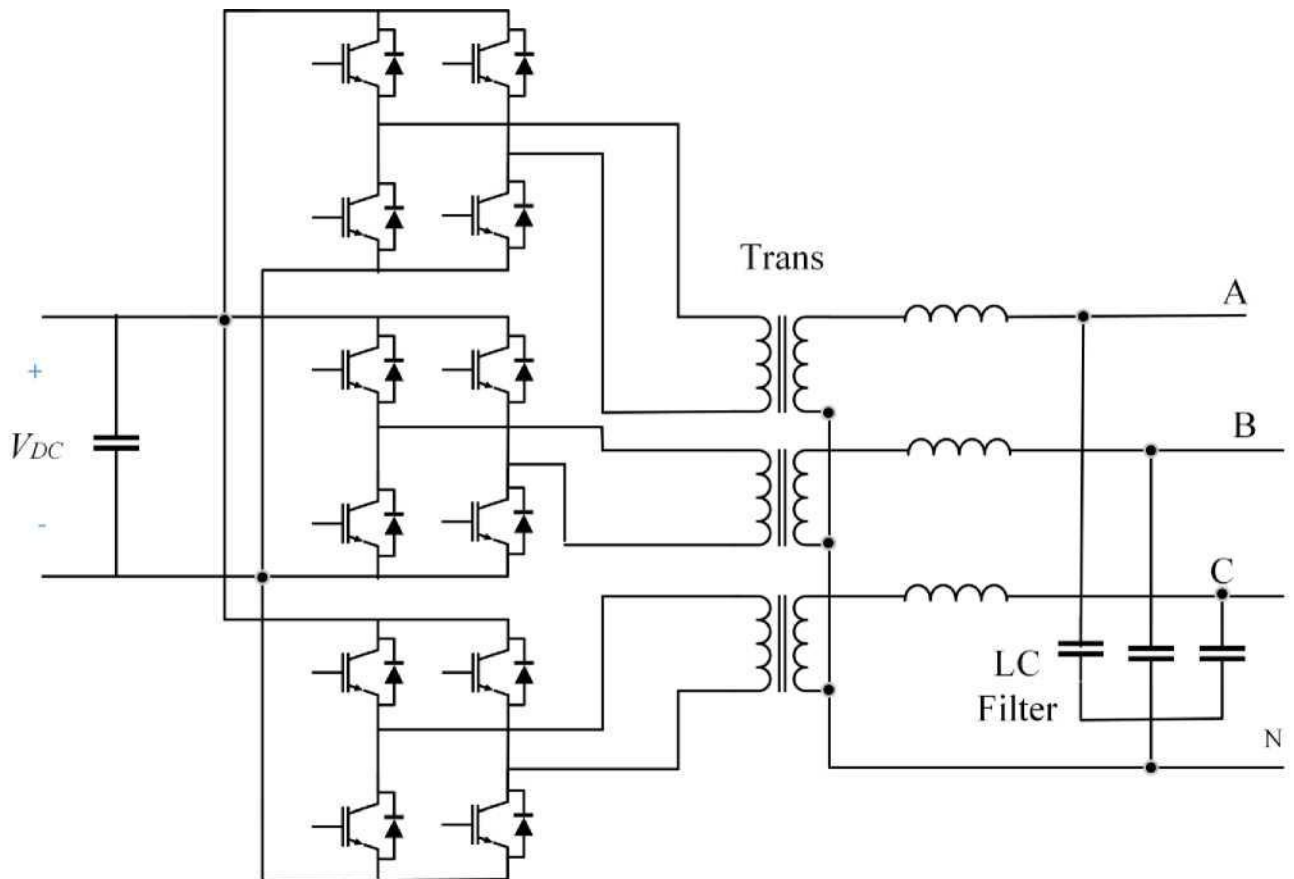


Рисунок 1.11. Топологія СЕМ на основі трьох окремих однофазних інверторів

Хоча у цій топології потрібна більша кількість транзисторів, вихідна напруга має найкращий гармонійний профіль, а вимога до вихідних пасивних фільтрів зменшується. Тут може бути досягнута більш висока надійність, тому що кожна фаза незалежна і під час збою у будь-якій фазі дві інші фази можуть ще забезпечувати трифазні навантаження. Таким чином, схема допускає пофазне регулювання вихідної напруги. Основним недоліком цієї топології є необхідність використовувати розділові трансформатори, що працюють на основній частоті, які необхідні для ізоляції, безпеки та узгодження напруги. У цьому сенсі недолік «узгодження» може перетворитися на гідність, якщо, наприклад, СЕС використовується у призначенні джерела безперебійного електропостачання, коли ланка постійного струму представлена акумуляторною батареєю. У цьому випадку доцільний варіант виконання фільтра, що згладжує, з розміщення дроселя в первинній низьковольтній ланцюга, а конденсатора фільтра у вихідній високовольтного ланцюга, енергія дроселя визначається його струмом, а енергія конденсатора напругою (рисунок 1.12).

Як трансформаторні варіанти СЕС з нульовим проводом може бути реалізована також на основі схеми Скотта (рисунок 1.13). Для реалізації в схемі керування повинна бути передбачена фазозсувний пристрій ФСУ.

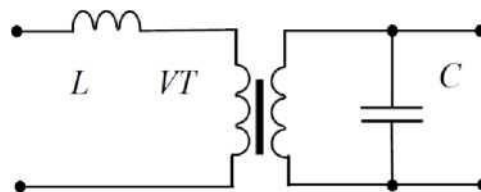


Рисунок 1.12. Варіант виконання фільтра, що згладжує.

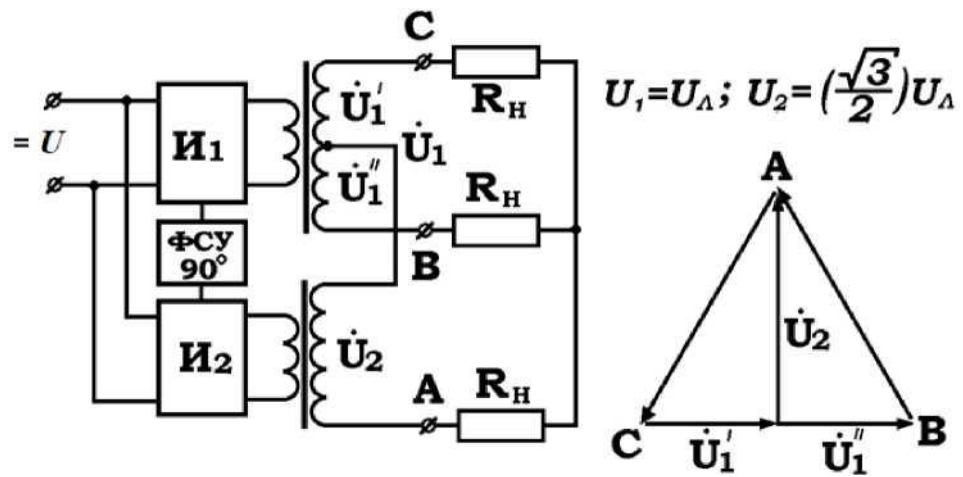


Рисунок 1.13. Топологія СЕС на основі схеми Скотта

1.4 Висноки до розділу

Проведено аналіз Micro Grid як концепції малої розподіленої енергетики. Розглянуто конфігурацію напівпровідникових автономних СЕС. Проведено оглядовий аналіз методів керування технічними системами, здатних знайти застосування в автономних напівпровідникових СЕС.

2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Порівняльний аналіз алгоритмів керування СЕС

На основі проаналізованих топологічних схем та математичних моделей, у пакеті Matlab Simulink були розроблені відповідні імітаційні моделі (див. рис. 2.1-2.4) Параметри СЕС та навантажень, використані при моделюванні, наведені у таблицях 2.1, 2.2. Моделювання роботи СЕС з нульовим проводом здійснювалося з метою порівняння якості формування вихідної напруги у статичному та динамічному режимах, а також для дослідження чутливості керування до зміни навантаження та параметрів вихідного LC-фільтра. При цьому використовувалися збалансовані (симетричні) та незбалансовані (несиметричні) активні та активно індуктивні навантаження, а також нелінійні навантаження (симетричні та несиметричні).

Таблиця 2.1 Параметри моделювання СЕС

Параметр	Значення
Напруга ланки постійного струму АІН	$V_{dc} = 640$ В
Час вибірки	$T_s = 20$ мкс
Частота комутації ШІМ	$f_s = 4000$ Гц
Ємність конденсатора постійного струму	$C_{dc} = 1000$ мкФ
Параметри LC-фільтра	$L = 2,5$ мГн, $C = 80$ мкФ

Таблиця 2.2 Параметри навантаження СЕС

Дослід	Параметри навантаження
1) Збалансовані резистивні навантаження	$R_a = R_b = R_c = 15$
2) Збалансовані індуктивні навантаження	$R_a = R_b = R_c = 10$ О $L_a = L_b = L_c = 20$ мН
3) Незбалансовані резистивні навантаження	$R_a = 50$, $R_b = 100$, $R_c = \text{так}$
4) Незбалансовані індуктивні навантаження	$R_a = 50$, $R_b = 100$, $R_c = \text{так}$ $L_a = 10$ мН, $L_b = 30$ мН
5) Незбалансовані нелінійні навантаження	$L_a' = 50$ мГн, $R_a = 20$ Ом, $R_{b1}' = 1$ Ом, $R_{b2}' = 60$ Ом, $C_{b1}' = 3000$ мкФ, $L_c' = 20$ мГн, $R_c = 70$ Ом, $C_c' = 5000$ мкФ

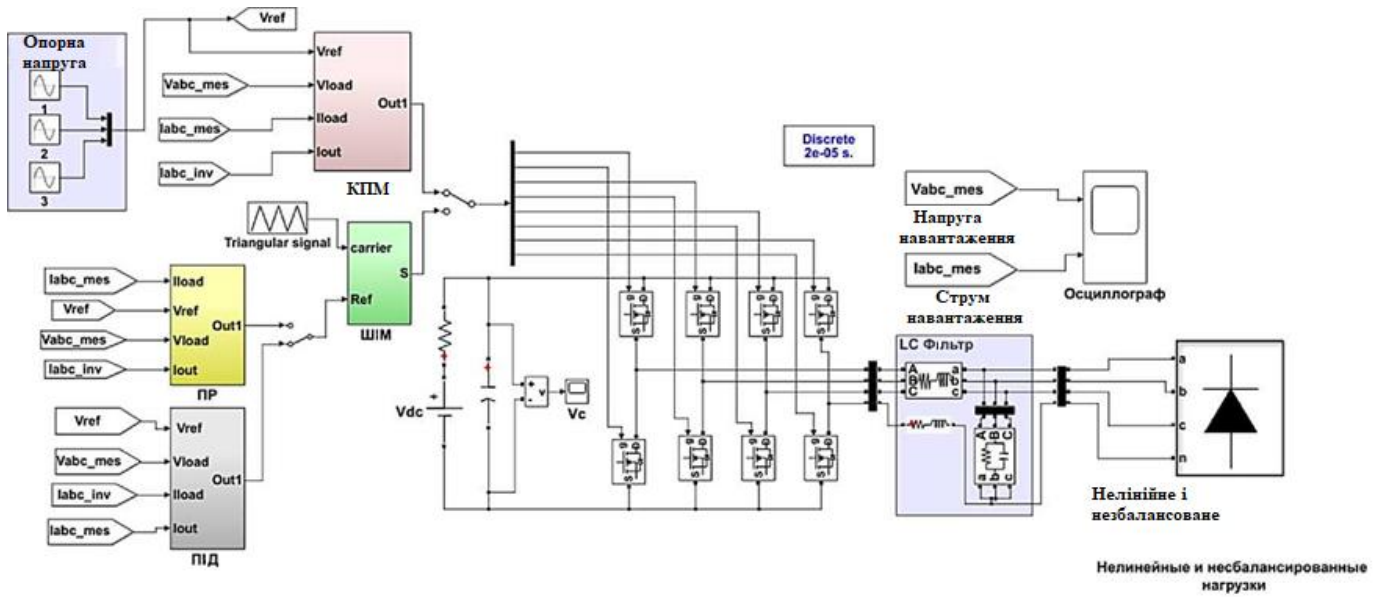


Рисунок 2.1. Віртуальна схема СЕС при керуванні АІН на основі трьох методів керування (КПМ, ПР-регулятор та ПІД-регулятор)

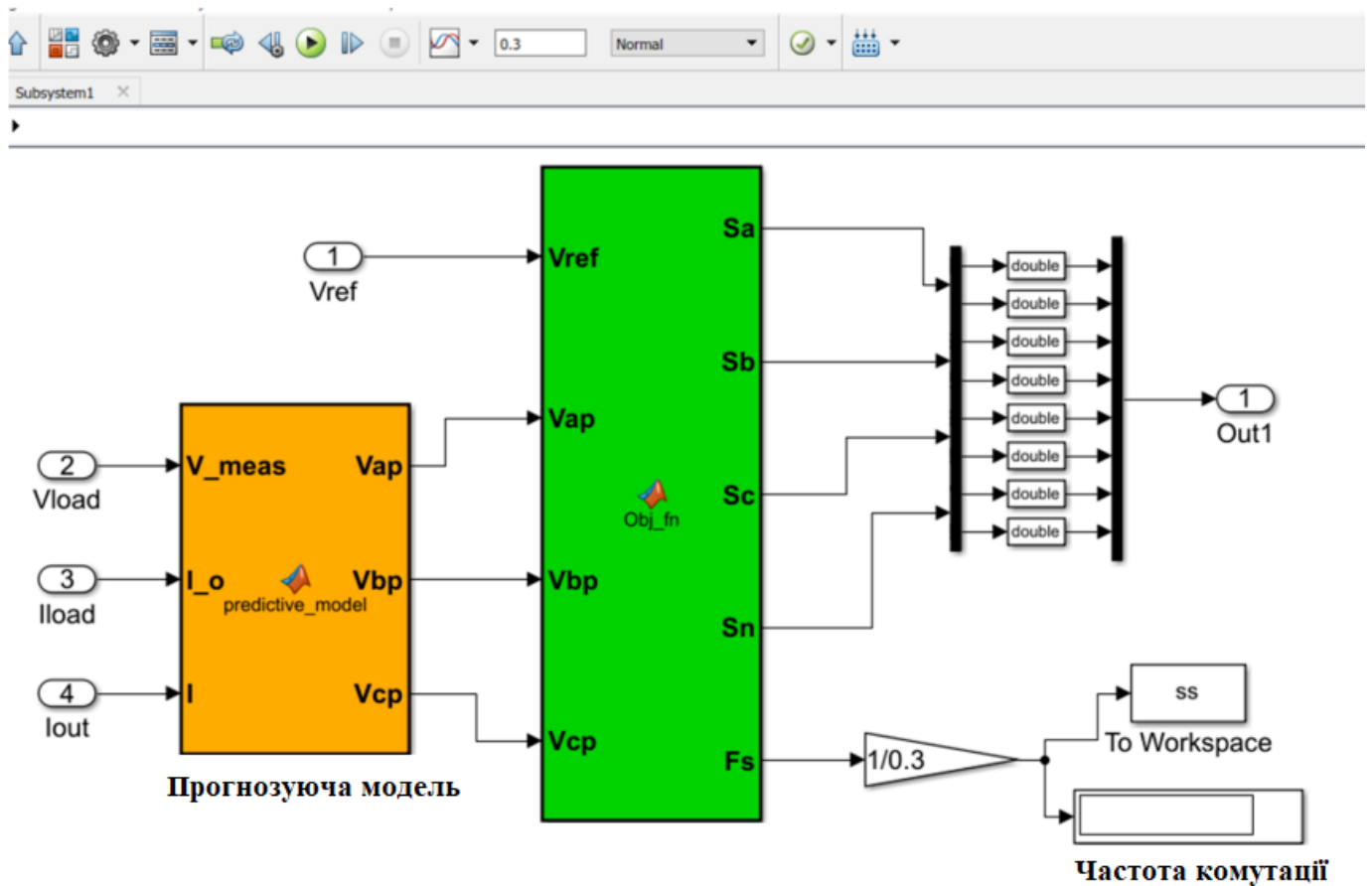


Рисунок 2.2. Схема КПМ у пакеті Matlab Simulink

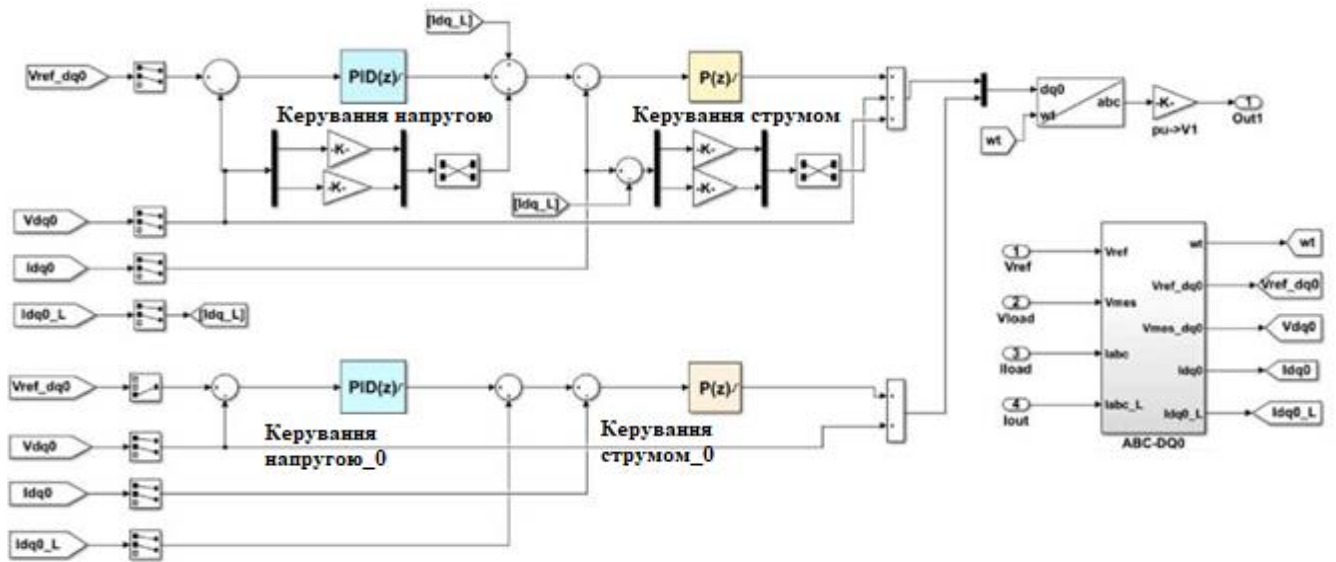


Рисунок 2.3. Схема ПІД-регулювання у пакеті Matlab Simulink

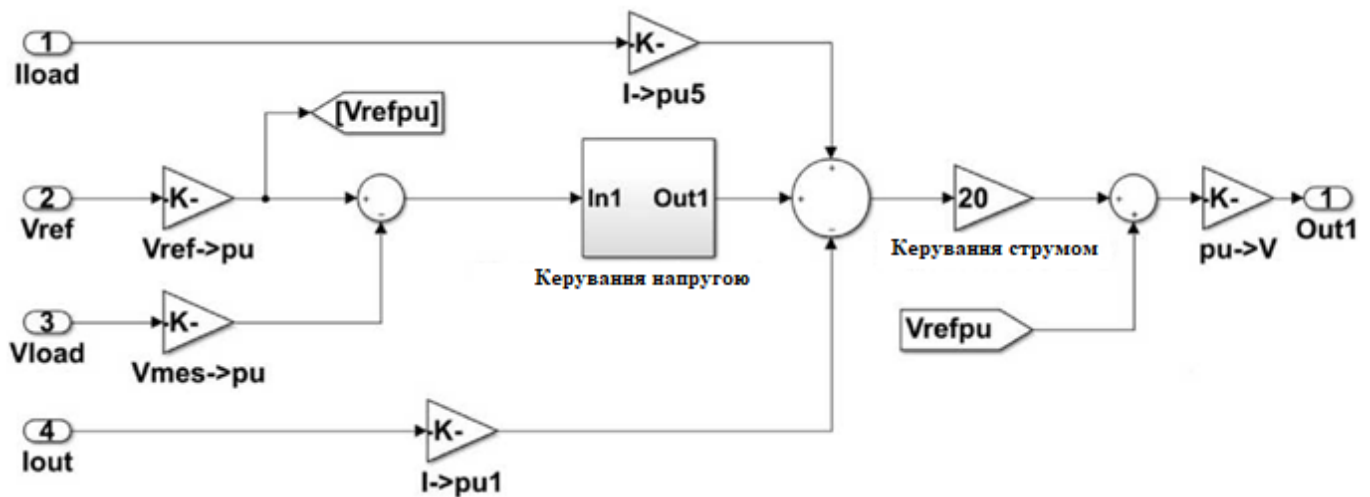


Рисунок 2.4. Схема ПІ-регулювання у пакеті Matlab Simulink

2.2 Вибір алгоритму лінійного керування

У другому розділі були представлені та розроблені два методи лінійного керування - ПІД-регулювання та ПІ-регулювання, які засновані на ШІМ при регулюванні напруги інвертора. У цьому розділі буде обрано один з цих методів керування для проведення порівняльного аналізу з КІМ.

Для виявлення ефективності та стійкості цих двох методів керування було проведено три тематичні дослідження:

- 1) незбалансовані резистивні навантаження;

- 2) незбалансовані індуктивні навантаження;
- 3) незбалансовані нелінійні навантаження, топологія яких представлена рис. 2.9.

Сигнали напруги навантаження, струмів навантаження та напруги ланки постійного струму для АН для трьох умов навантаження показані на рисунках 2.5-2.7. Результати показують, що ПР- та ПД-регулятори здатні регулювати напругу навантаження з низьким гармонічним спотворенням для незбалансованого резистивного та індуктивного навантаження.

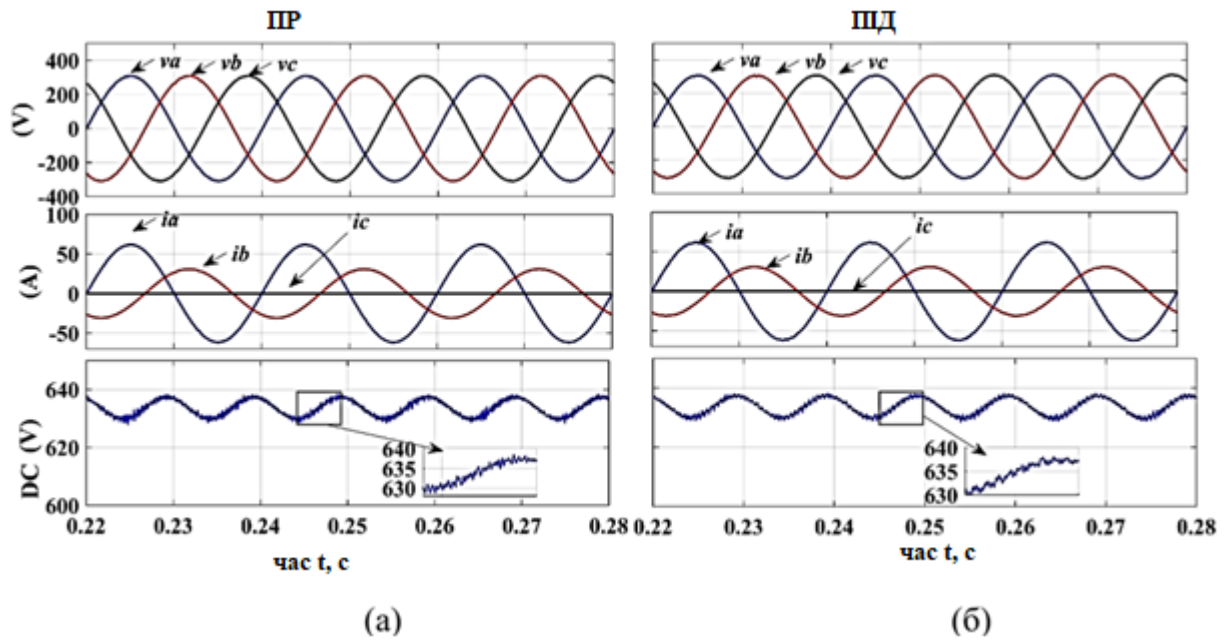


Рисунок 2.5. Результати моделювання СЕС (незбалансовані резистивні навантаження) при (а) ПР- та (б) ПД-алгоритмах

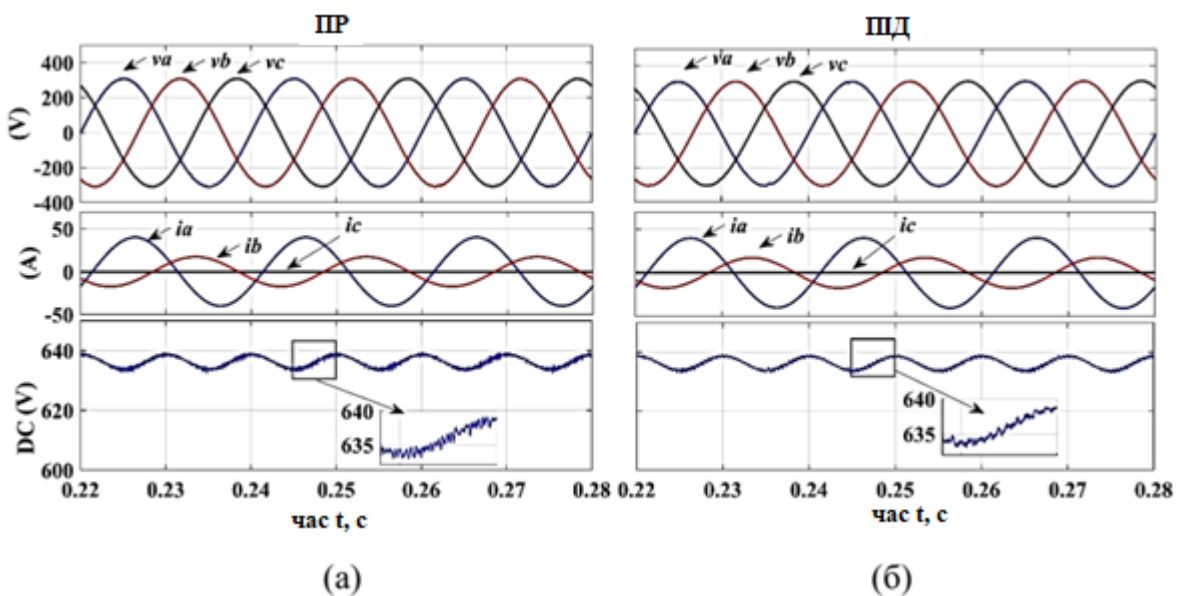


Рисунок 2.6. Результати моделювання СЕС (незбалансовані індуктивні навантаження) при (а) ПР- та (б) ПД-алгоритмах

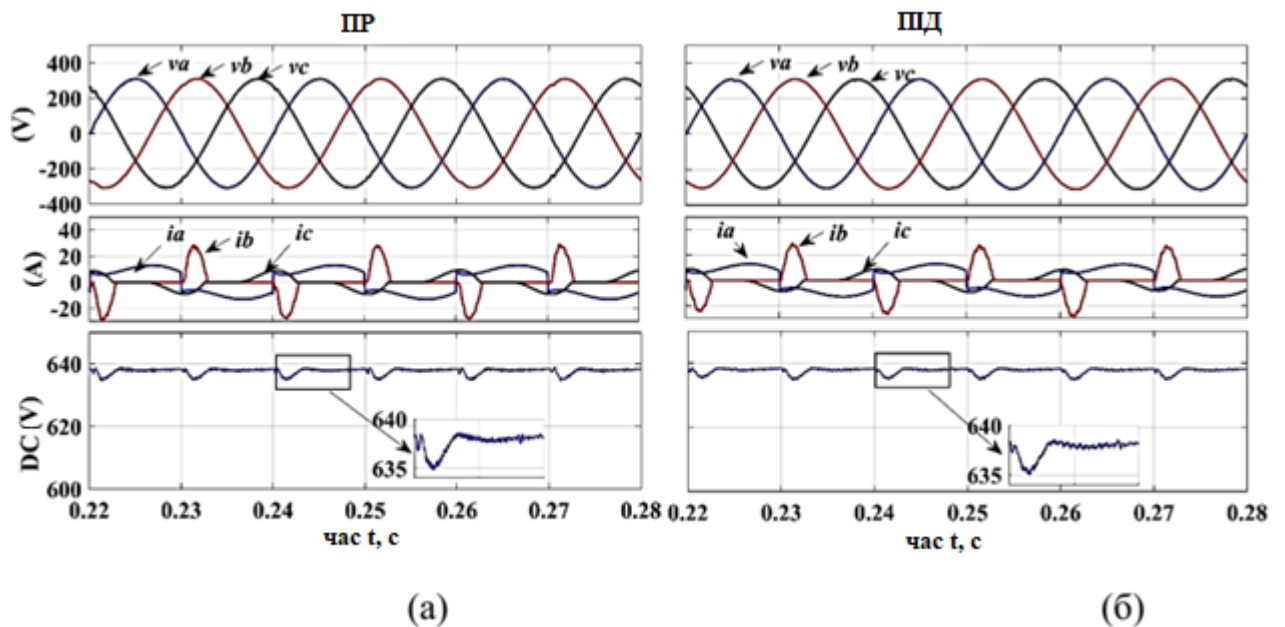


Рисунок 2.7. Результати моделювання СЕС (незбалансовані нелінійні навантаження) при (а) ПР- та (б) ПД-алгоритмах

Проведені дослідження показують, що порівняно з ПД-регулятором ПР-регулятор забезпечує трохи більші гармоніки в навантаженнях, тому що ПР-регулятор, який використовується в цій роботі, заснований лише на одному резонансному фільтрі для основної частоти. Щоб покращити характеристики цього методу керування, необхідно додати більше резонансних фільтрів інших гармонійних частот. Це робить конструкцію системи керування дуже складною. Також, ПР-регулятор забезпечує більш високу пульсацію напруги ($\%V_c$) у ланці постійного струму АН порівняно з ПД-регулятором, але ця різниця дуже мала, як показано в таблиці 2.3.

При динамічному режимі застосовувалася ступінчаста зміна від холостого ходу до збалансованого резистивного навантаження ($R_a = R_b = R_c = 10 \text{ Q}$) в 0,2 секунди, напруги навантаження та струми для ПР- та ПД-алгоритмах показані на рис. 2.8, де додатково представлений збільшений вигляд вимірної напруги з його опорною тимчасовою формою при цій зміні. Результати

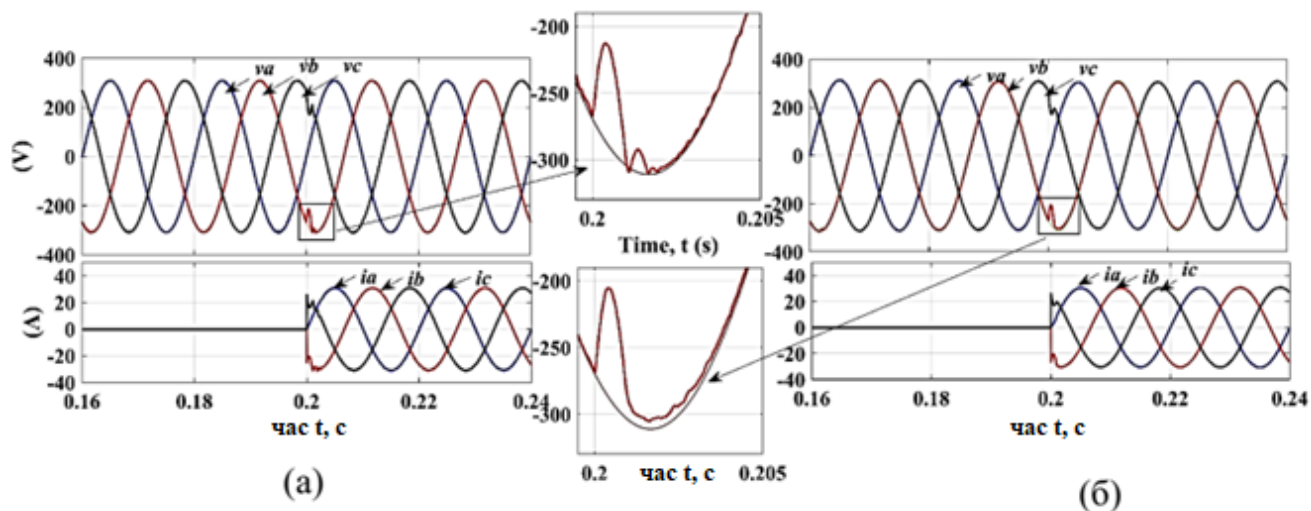


Рисунок 2.8. Напруги та струми навантаження СЕС при динамічному режимі для (а)ПР- та (б) ПІД-алгоритмах

Таблиця 2.3 Порівняння якості двох методів лінійного керування

Дослід	ПР				ПІД			
	% ΔV_{dc}	%КГС			% ΔV_{dc}	% КГС		
		Фа	Фб	Фс		Фа	Фб	Фс
1) Незбалансовані резистивні навантаження	1.65	1.36	1.36	1.46	1.5411	1.45	1.47	1.44
2) Незбалансовані індуктивні навантаження	1.084	1.55	1.56	1.53	1.0109	1.49	1.48	1.45
3) Незбалансовані нелінійні навантаження	0.818	1.72	1.66	1.65	0.7095	1.62	1.5	1.54

З представлених результатів автором обраний ПІД-регулятор як лінійний регулятор для подальшого використання в порівняльному дослідженні з КПМ, оскільки ПІД-регулятор простіше, ніж ПР-регулятор, і простіше в налаштуваннях своїх параметрів. Більш того, автором виявлено, що ПІД-регулятор має порівнянні продуктивності з регулятором ПР-регулятором. У наступному розділі буде проведено повне порівняльне дослідження запропонованого алгоритму КПМ та представленого ПІД-регулювання.

2.3 Статичний режим роботи СЕС

Для виявлення відмінностей між КПМ та ПД у статичному режимі було проведено п'ять тематичних досліджень. Трифазні симетричні та несиметричні навантаження можуть бути резистивними або індуктивними, та підключаються до інвертора. Крім того, однофазні нелінійні навантаження використовують для відображення характеристик систем керування в нелінійних умовах. Топологія цих навантажень представлена рис. 2.9. Параметри навантажень, що використовуються у моделюванні, наведено в таблиці 2.2.

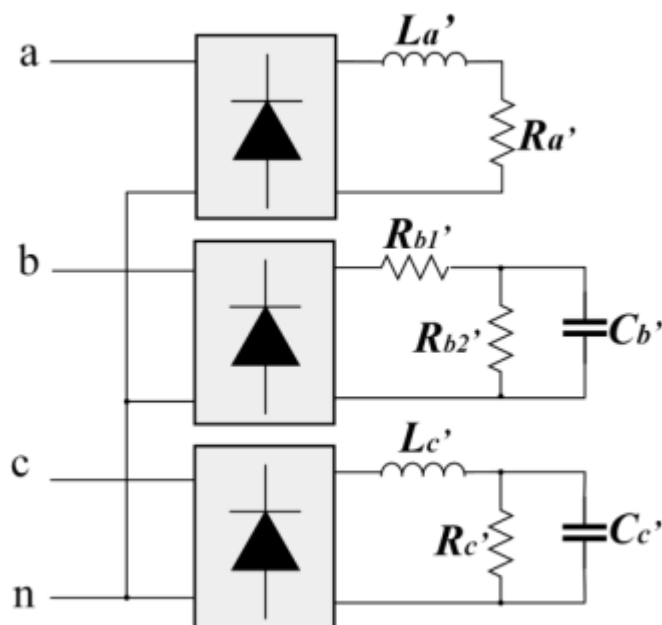


Рисунок 2.9. Топологія однофазних навантажень СЕС, що використовуються у моделюванні

Сигнали напруги навантаження, струмів навантаження та напруги ланки постійного струму для АН у п'яти умовах навантаження показані на рисунках 2.102.14. Для оцінки різниці між показниками КПМ та ПД, частота комутації, КГС, індекс дисбалансу напруги (ІДН) [88] та пульсація напруги (% Vc) в

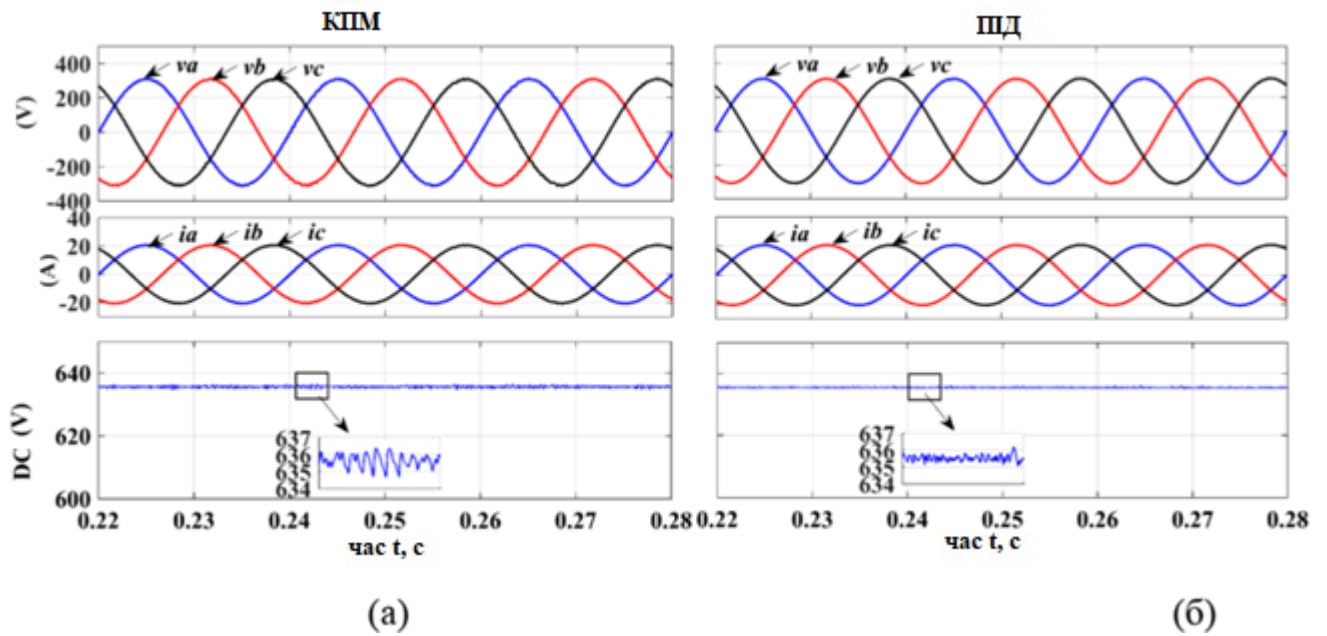


Рисунок 2.10. Результати моделювання СЕС (дослід 1: балансовані резистивні навантаження) при (а) КПМ та (б) ПІД

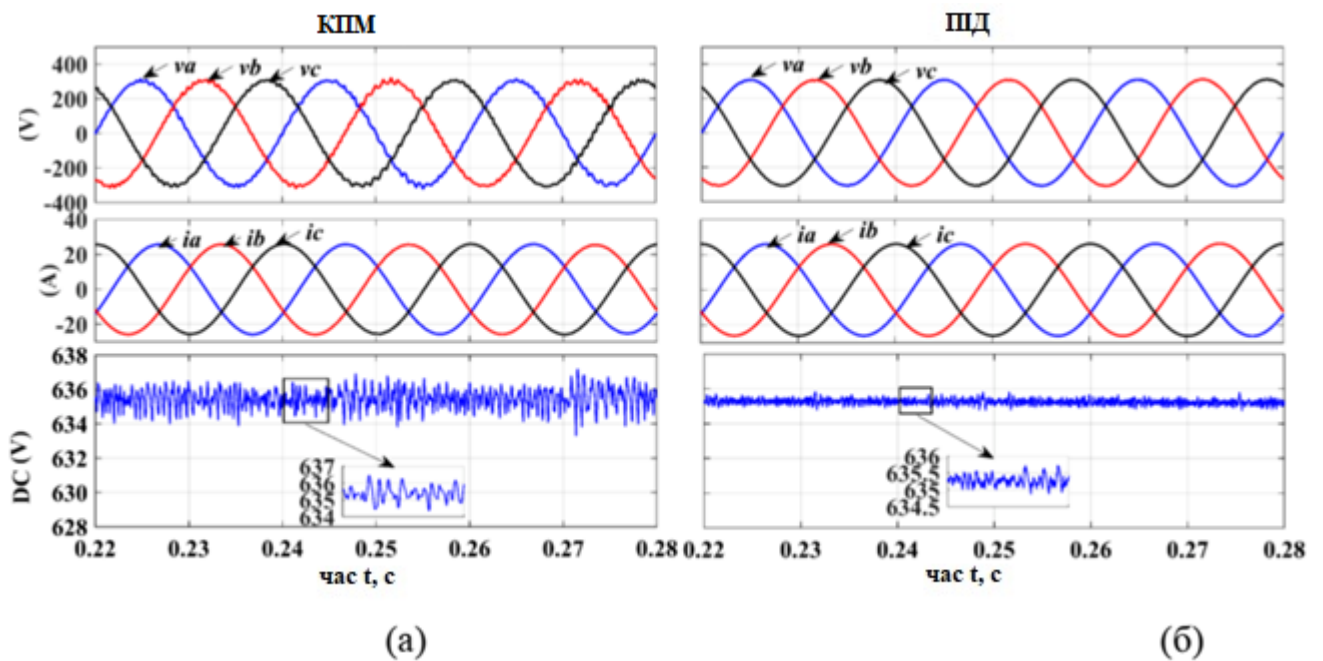


Рисунок 2.11. Результати моделювання СЕС (дослід 2: балансовані індуктивні навантаження) при (а) КПМ та (б) ПІД

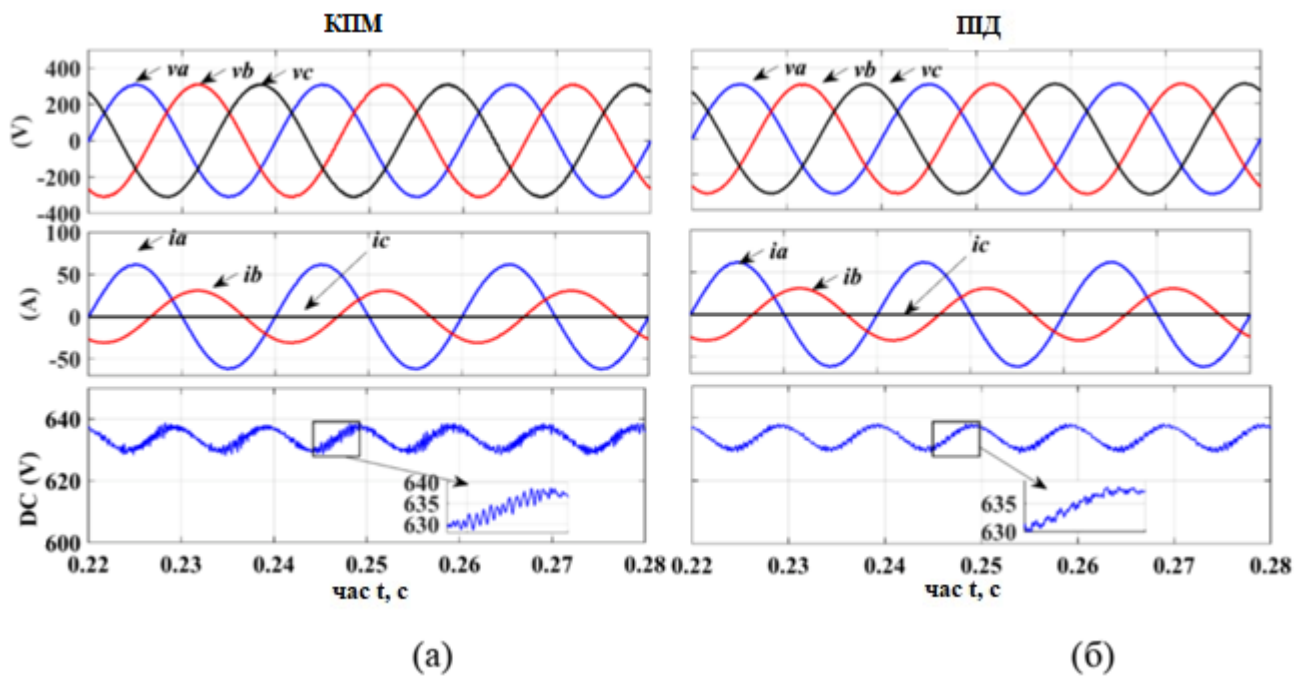


Рисунок 2.12. Результати моделювання СЕС (дослід 3: незбалансовані резистивні навантаження) при (а) КПМ та (б) ПІД

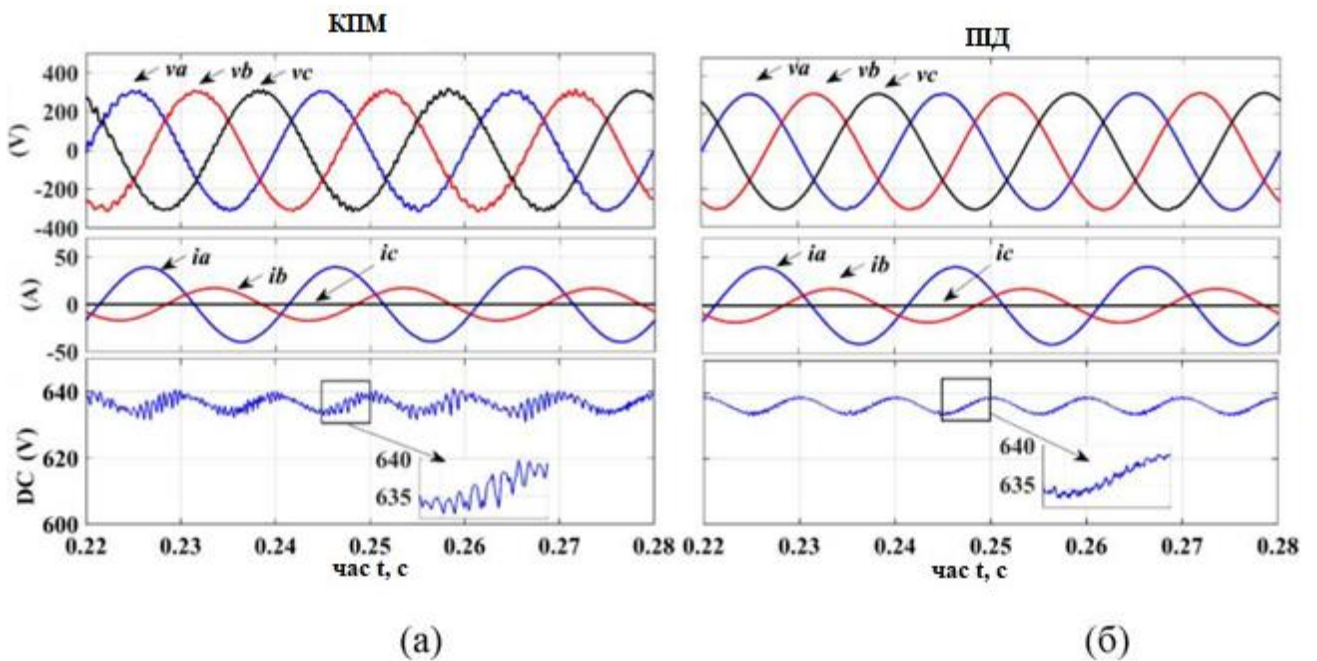


Рисунок 2.13. Результати моделювання СЕС (дослід 4: незбалансовані індуктивні навантаження) при (а) КПМ та (б) ПІД

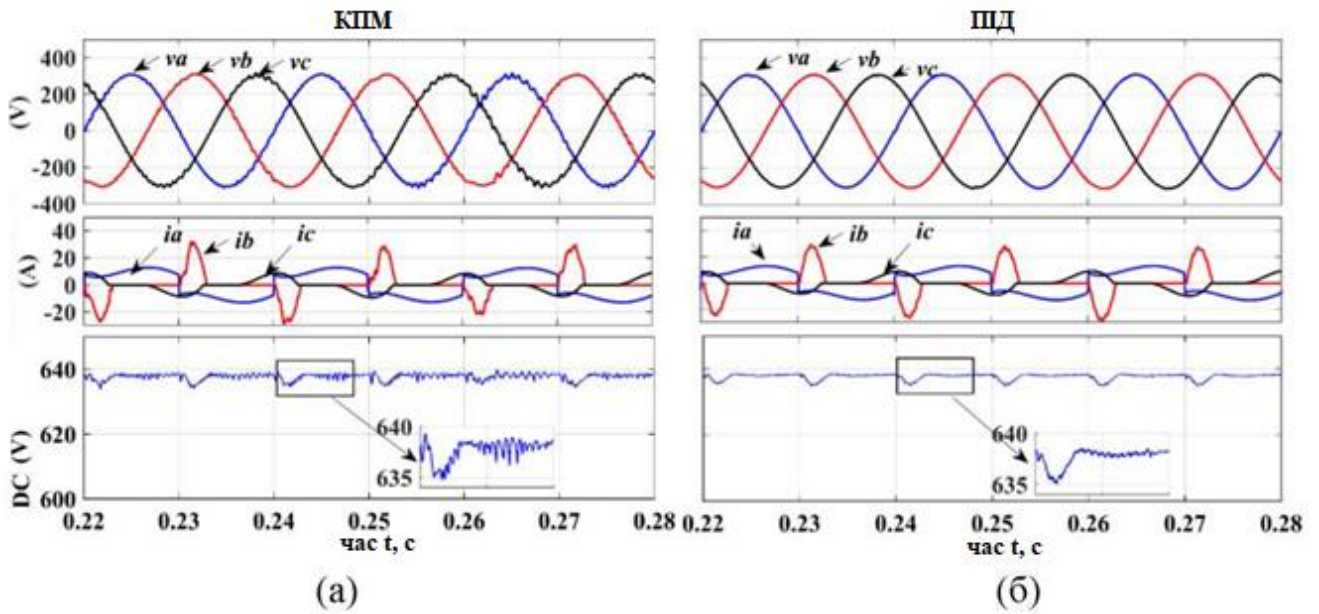


Рисунок 2.14. Результати моделювання СЕС (дослід 5: незбалансовані нелінійні навантаження) при (а) КПМ та (б) ПІД

Таблиця 2.4 Порівняльний аналіз керування з КПМ та ПІД-алгоритмами

Дослід	КПМ						ПІД					
	f_s (Hz)	% ΔV_{dc}	%КГС			% ІДН	f_s (Hz)	% ΔV_{dc}	%КГС			% ІДН
			Фа	Фб	Фс				Фа	Фб	Фс	
1	3754	0.3248	1.01	1.01	1.01	0.2248	4000	0.2004	1.29	1.3	1.26	0.1815
2	2071	0.6160	3.2	3.2	3.2	0.9592	4000	0.1971	1.4	1.4	1.4	0.1524
3	3968	1.7164	0.76	0.96	0.96	0.2007	4000	1.5411	1.45	1.47	1.44	0.1218
4	2177	1.6084	3.74	3.36	3.74	1.8977	4000	1.0109	1.49	1.48	1.45	0.3219
5	2436	0.8668	2.13	2.06	2.35	0.9426	4000	0.7095	1.62	1.5	1.54	0.0575

Результати проведених досліджень показують, що КПМ, як і ПІД, здатне регулювати напругу навантаження з низьким гармонічним спотворенням для збалансованого та незбалансованого резистивного навантаження. Порівняно з ПІД-регулюванням КПМ забезпечує нижче гармонічне спотворення в умовах активного навантаження; загальне гармонічне спотворення (% КГС) нижче 1%.

Відсоток КГС при КПМ вищий у разі індуктивних та нелінійних навантажень, але не більше 4%. Це може бути пов'язане із затримкою зміни індуктивного струму, що знижує точність прогнозування напруги навантаження.

КПМ забезпечує більш високу пульсацію напруги ($\% \Delta V_{dc}$) у ланці постійного струму АІН порівняно з ПІД, але за більш високої потужності КПМ забезпечує нижчу $\% \Delta V_{dc}$. Ця різниця очевидна із залежностей, представлених на рис. 2.17. Відповідно до стандартів ІЕЕЕ дисбаланс напруги необхідно підтримувати на низькому рівні, щонайменше 2% для чутливих навантажень. Значення ІДН підтримується нижче 2% у всіх тестованих умовах обох стратегій керування. Більше того, ІДН нижче при КПМ, ніж при ШІМ, за всіх умов навантаження, за винятком випадку нелінійного навантаження.

Особливість КПМ у тому, що це алгоритм працює зі змінною частотою комутації (f_s). Частота комутації обмежена часом вибірки, як показано у результатах. Частота перемикачів вбирається у 5500 Гц в усіх тематичних дослідженнях. На рис.2.18 показано залежність частоти комутації КПМ у функції зміни потужності навантаження та коефіцієнта потужності. Частота комутації різко зростає зі збільшенням коефіцієнта потужності та обмежена значенням 5500 Гц.

2.4 Динамічний режим роботи СЕС

Для дослідження поведінки СЕС у динамічному режимі роботи проводилася ступінчаста зміна збалансованого резистивного навантаження від холостого ходу до значення ($R_a = R_b = R_c = 10 \Omega$) у 0,2 секунди. Напруги навантаження та струми для КПМ та ПІД-алгоритмів представлені на рис. 2.15, де додатково показаний збільшений вид вимірної напруги з його опорною тимчасовою формою при цій зміні. Результати показують, що КПМ-алгоритм забезпечує більше швидкий динамічний відгук у порівнянні з ПІД-алгоритмом. Швидка динамічна реакція КПМ можлива усунення стадії модуляції

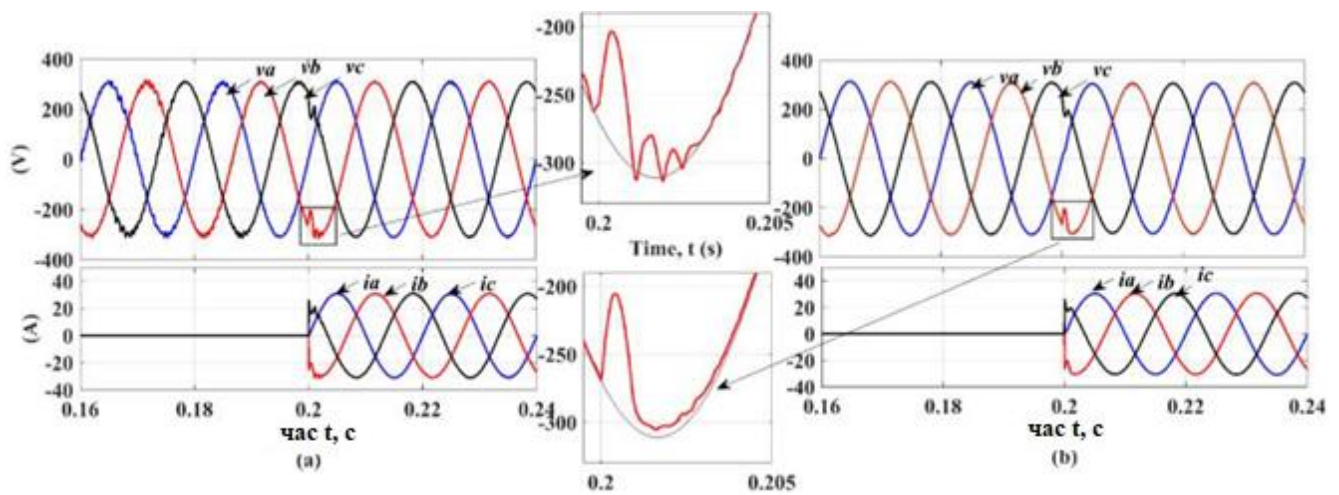


Рисунок 2.15. Напруги та струми навантаження СЕС при динамічному режимі для (а) КПМ- та (б) ПІД-алгоритмів

2.5 Аналіз чутливості керування

Для аналізу чутливості керування та оцінки впливу зміни навантаження та зміни параметрів LC-фільтра на характеристики керування при КПМ- та ПІД-алгоритмах було проведено два тести. Критеріями оцінки цих тестів є середній відсоток КГС, $\% \Delta V_{dc}$ та f_s . В одному тесті на стійкість до зміни навантаження активна потужність навантаження змінюється від нуля до 80 кВт за різних коефіцієнтів потужності.

Для другого випробування індуктивність фільтра варіюється від 1,5 до 3,5 мГн із кроком зміни 0,2 мГн, а ємність фільтра від 50 до 100 мкФ із кроком зміни 5 мкФ. Можна відзначити, що параметри навантаження в пропонованій прогнозуючій моделі не враховуються, тоді як стандартний опір навантаження враховується в конструкції ПІД-регулятора, яка становить ($R_L = 10 \text{ Ом}$, $L_L = 1 \text{ мГн}$). Крім того, модель і ПІД-регулятор «розпізнають» стандартні значення параметрів LC-фільтра, які складають 2,5 мГн і 80 мкФ.

На рис. 2.16 показано зміну КГС від зміни потужності навантаження та коефіцієнта потужності для КПМ та ПІД. Відхилення КГС від холостого ходу до високого навантаження в алгоритмі КПМ нижче, ніж в алгоритмі ПІД за різних коефіцієнтів потужності. Можна помітити, що КПМ має більшу стійкість до змін навантаження, ніж ПІД.

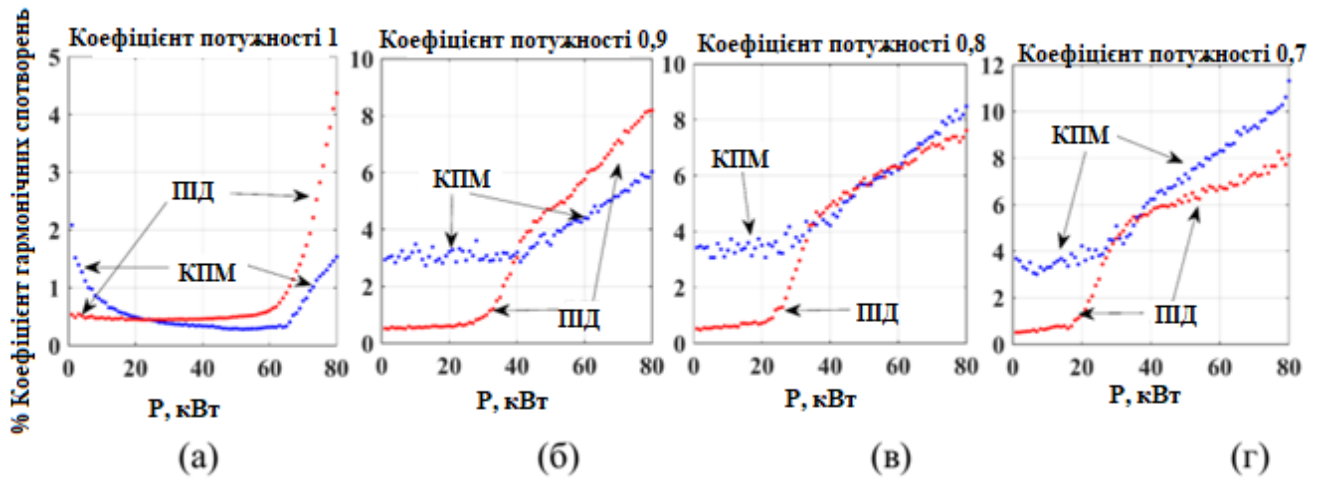


Рисунок 2.16. Зміна % КГС зі зміною потужності навантаження при коефіцієнт потужності дорівнює (а) 1, (б) 0.9, (в) 0.8, (г) 0.7

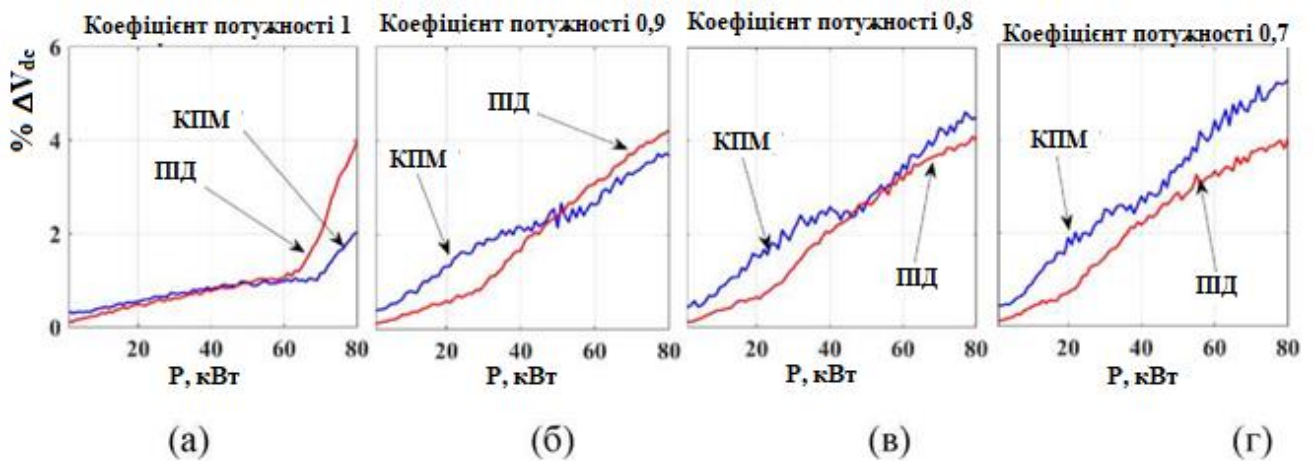


Рисунок 2.17. Зміна % ΔV_{dc} із зміною потужності навантаження при коефіцієнті потужності дорівнює (а) 1, (б) 0.9, (в) 0.8, (г) 0.7

Зміна ΔV_{dc} для керування КПМ та ПД при зміні навантаження показана на рис. 2.17. Зміна навантаження трохи впливає на величину ΔV_{dc} для двох методів керування.

Високе значення f_s призводить до великих втрат перемикання інвертора та перегріву ключів. Крім того, висока варіація f_s ускладнює конструкцію та вибір LC-фільтра. Однак КПМ працює зі змінною f_s яка обмежена часом вибірки та не перевищує значення 5500 Гц для резистивних та індуктивних навантажень. На рис. 2.18 показано зміну f_s із зміною потужності навантаження та коефіцієнта потужності. У разі стану резистивного навантаження при збільшенні

навантаження f_s різко зростає, але обмежується значенням 5500 Гц. Значення f_s обмежено частотою дискретизації, оскільки алгоритм керування повторюється у період дискретизації.

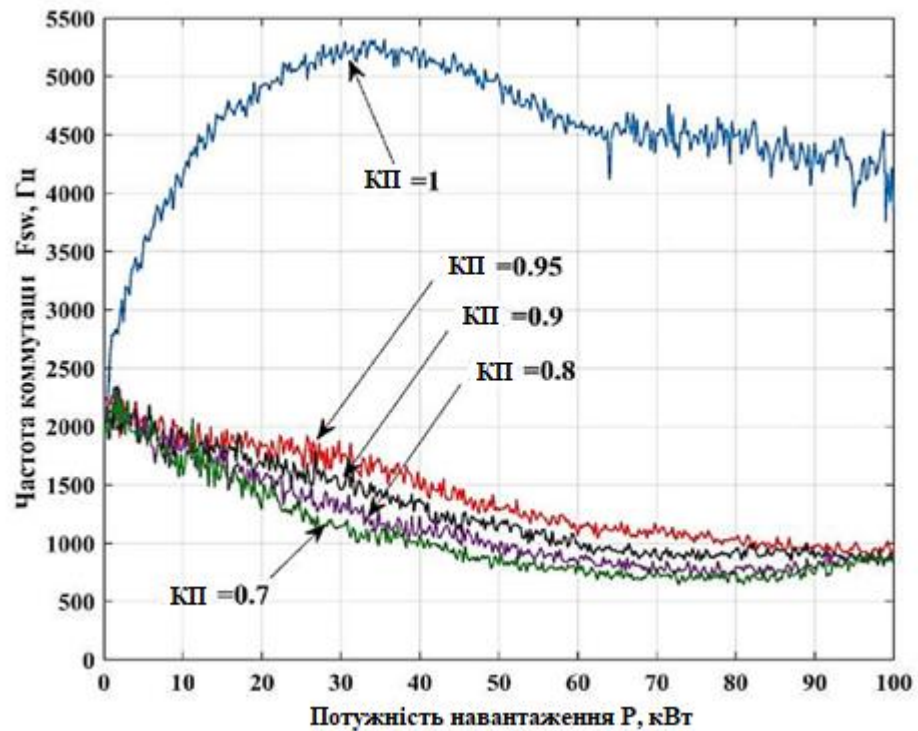


Рисунок 2.18. Частота комутації КІМ із зміною потужності навантаження та коефіцієнта потужності

Оскільки керування з прогнозуючою моделлю в основному залежить від параметрів LC-фільтра, у тесті на стійкість до зміни LC-фільтра розглядаються дві робочі умови:

- ЗП: зміна параметрів фільтра, доки модель системи не змінилася. У цьому випадку представлена невідповідність між фактичними параметрами та параметрами моделі;
- ЗПП: зміна параметрів фільтра та, відповідно, одночасна зміна моделі системи.

2.6 Висновки до розділу

Проведені в розділі 2 дослідження дозволяють більш глибоко та наочно представити електромагнітні процеси та режими роботи СЕС з нульовим

проводом при реалізації алгоритмів керування на основі ПІД- та ПР-регуляторів та прогновної моделі (КПМ). На основі проведених досліджень:

у пакеті Matlab Simulink розроблена імітаційна модель СЕС при керуванні АІН з нульовим проводом на основі трьох методів керування: з ПР-регулятором, ПІД-регулятором та з прогновною моделлю (КПМ);

проведено порівняння функціонування СЕС з нульовим проводом при реалізації ПР-регулятора та ПІД-регулятора у статичному та динамічному режимах.

проведено порівняння функціонування СЕС з нульовим проводом при реалізації ПІД-регулятора та КПМ у статичному та динамічному режимах за різних характеристик навантажень, у тому числі нелінійного. Показано, що КПМ-алгоритм забезпечує швидший динамічний відгук, порівняно з ПІД-алгоритмом. Результати проведених досліджень показують, що КПМ, як і ПІД-алгоритм, здатний регулювати напругу навантаження з низьким гармонічним спотворенням для збалансованого та незбалансованого резистивного (у тому числі і нелінійного) навантаження. Порівняно з ПІД-регулюванням КПМ забезпечує нижче гармонічне спотворення в умовах активного навантаження нижче 1%.

3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Оптимізація алгоритму КПМ

Реалізація алгоритму КПМ, представленого у роботі, ефективно лише в тому випадку, якщо він узгоджений з відпрацюванням аварійних режимів СЕС, насамперед режиму навантаження по вихідному струму аж до короткого замикання (КЗ) навантаження. Завдання поширення алгоритму КПМ на аварійні режими роботи СЕС ускладнюється тим, що в реальних умовах навантаження або КЗ можуть виникати у різних топологіях схеми СЕС: однофазне, двофазне або трифазне КЗ. Завдання запропонованого алгоритму - автоматично перебудовуватися залежно від режиму роботи СЕС, зберігаючи, наскільки це можливо, якість вихідної напруги по фазах інвертора, ефективно обмежуючи струми короткого замикання, не впливаючи на напругу навантаження справних фаз.

На практиці для вирішення поставленого вище завдання запропонований алгоритм повинен включати багатоцільову оптимізацію з обмеженнями і додаткові властивості алгоритму, які збільшують час обчислення алгоритму і призводять до затримки між моментом вимірювання і застосуванням нового рішення з керування. Для компенсації цієї затримки у запропонованому алгоритмі застосовується двокроковий час прогнозування. Для скорочення часу обчислень у запропонованому алгоритмі застосовується інтелектуальна оптимізація шляхом видалення обчислень, що повторюються, що не впливає на його продуктивність, і шляхом відділення алгоритму аварійного режиму від основного алгоритму. Алгоритм аварійного режиму активується тільки у разі виникнення короткого замикання, що призводить до скорочення часу обчислень, необхідного для алгоритма КПМ

При зменшенні часу вибірки T_s алгоритм КПМ показує найкращу продуктивність. Щоб зменшити T_s , високошвидкісні мікроконтролери повинні виконувати велику кількість обчислень за менший час, що призводить до високої вартості. У цій дисертаційній роботі запропонований КПМ оптимізований таким чином, що він поділяється на два алгоритми: алгоритм нормального режиму та

алгоритм аварійного режиму.

Метою алгоритму КПМ при нормальному режимі є керування вихідною напругою інвертора:

$$g = (v_a^* - v_a(k+2))^2 + (v_b^* - v_b(k+2))^2 + (v_c^* - v_c(k+2))^2 + F_{vim} \quad (3.1)$$

Деякі обчислення прогнозування напруги не потрібно виконувати при кожному стані перемикання. Щоб оптимізувати час, прогнозування напруги може бути переписано як:

$$\mathbf{v}(k+2) = \begin{bmatrix} v_a(k+2) \\ v_b(k+2) \\ v_c(k+2) \end{bmatrix} = \mathbf{Q}_v + j_1 \mathbf{e} \quad (3.2)$$

де:

$$\mathbf{Q}_v = \begin{bmatrix} Q_{va} \\ Q_{vb} \\ Q_{vc} \end{bmatrix} = q_1 \mathbf{v}(k+1) + q_2 \mathbf{i}(k+1) + j_2 \mathbf{i}_L(k+1) \quad (3.3)$$

\mathbf{Q}_v розраховується лише один раз за кожен інтервал.

В алгоритмі режиму КЗ цільова функція є поєднанням між регулюванням напруги і струмом залежно від місця та типу КЗ. Наприклад, якщо відбувається однофазне КЗ на фазі А, алгоритм керування діятиме як регулятор струму для фази А та регулятор напруги для інших фаз тощо. Прогнозування струму інвертора у цьому алгоритмі здійснюється з використанням (4.5) з модифікаціями:

$$\mathbf{i}(k+2) = \begin{bmatrix} i_a(k+2) \\ i_b(k+2) \\ i_c(k+2) \end{bmatrix} = \mathbf{Q}_i + j_3 \mathbf{e} \quad (3.4)$$

де:

$$\mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} Q_{ia} \\ Q_{ib} \\ Q_{ic} \end{bmatrix} = q_3 \mathbf{v}(k+1) + q_4 \mathbf{i}(k+1) + j_4 \mathbf{i}_L(k+1) \quad (3.5)$$

Немає необхідності прогнозувати всю напругу навантаження і всі струми інвертора для кожного періоду вибірки. Відповідно до типу та місцезнаходженням КЗ, \mathbf{Q}_i та \mathbf{Q}_v оцінюються один раз у кожному періоді вибірки, відповідно до рис. 3.1, що ілюструє блок-схему запропонованого оптимізованого алгоритму КПМ.

Цей алгоритм виконується кожної фази $j = a, b$ і c . Для подальшої оптимізації цільова функція в алгоритмі аварійного режиму розділена на три цільові члени (g_a, g_b, g_c), по одному цільовому члену кожної фази. Кожен

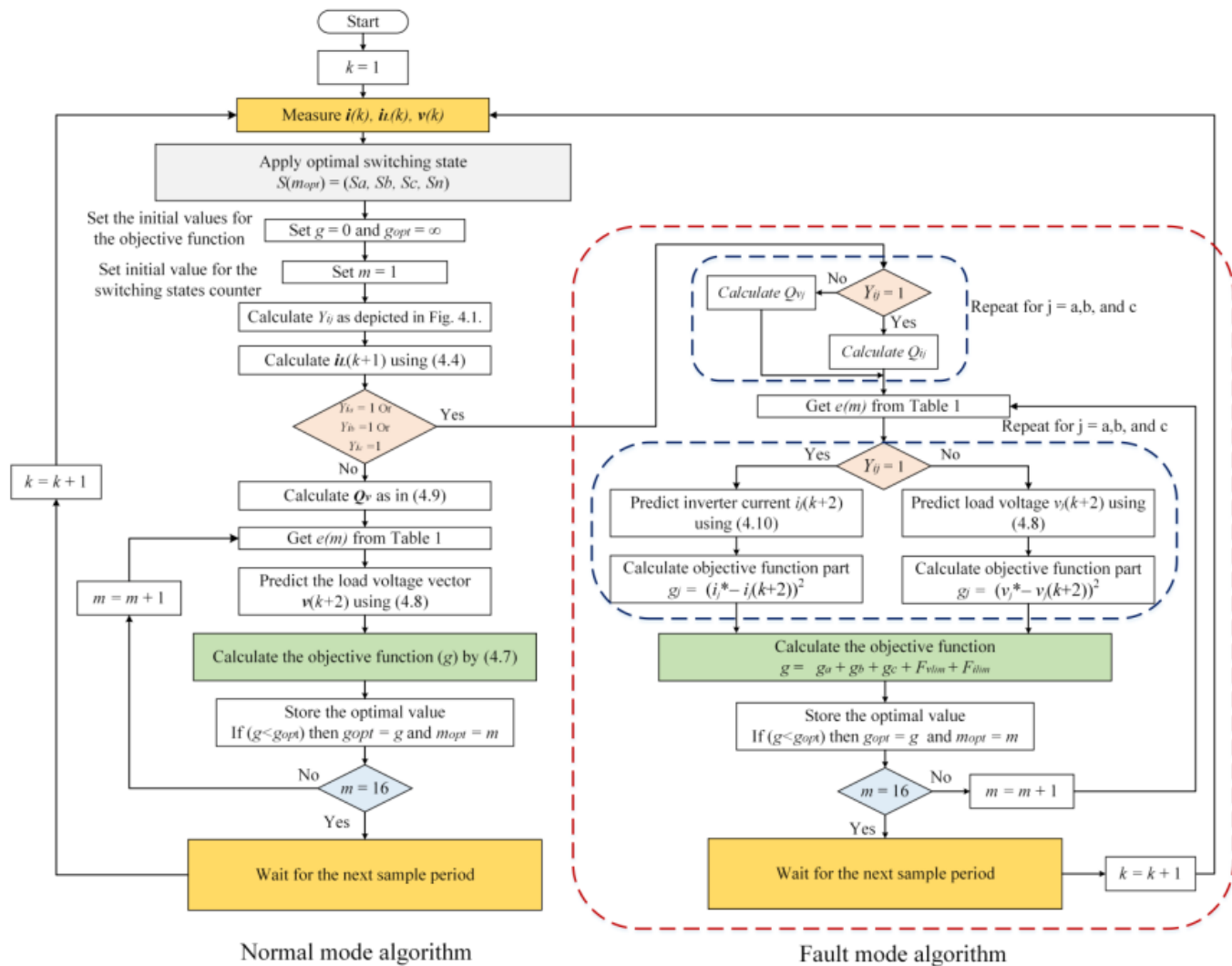


Рисунок 3.1. Блок-схема оптимізованого запропонованого алгоритму КІМ

3.2 Експериментальні результати проведених моделювань методів керування

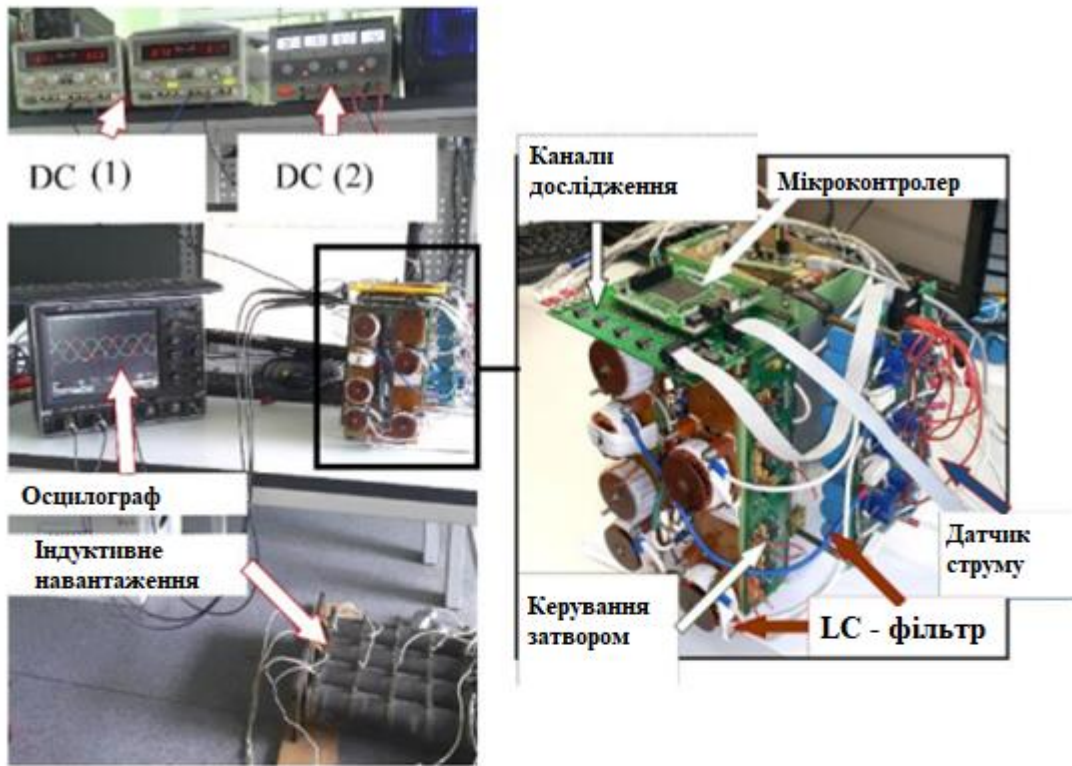
У цьому підрозділі представлені результати експериментальної перевірки запропонованих алгоритмів КІМ. Схема тестування у практичних експериментах застосовувалася така сама, як і у схемі моделювання. Мікропроцесорна система керування інвертором побудована з урахуванням мікроконтролера STM32F769BIT6 (216 МГц). Сигнали завдання розраховані та записані в пам'ять мікроконтролера. В якості датчика струму в каналах зворотного зв'язку

використовується датчик LEM GAS 25-NP. Вимірювання проводяться з дев'яти аналогових каналів, що містять фільтри нижніх частот на основі операційних підсилювачів. З міркувань безпеки напруга ланки постійного струму було обрано на рівні 60 В і формувалося двома джерелами постійної напруги по 30 В, включеними послідовно. Сигнали зворотного зв'язку напруги вимірювалися безпосередньо без використання датчика напруги. Аналогово-цифровий перетворювач вбудований у мікросхему мікроконтролера. Сигнали керування, що виробляються мікроконтролером, подавалися на драйвери силових транзисторів (MOSFET IXFN110N60P3). Для вимірювання електричних величин використовувався осцилограф LeCroy Wave Runner. Для живлення схеми мікропроцесорного модуля та датчиків струму використовувався окремий блок живлення. Параметри системи наведено у таблиці 3.1. Фотографії системи та електрична схема показані на рис. 3.2 Для живлення схеми мікропроцесорного модуля та датчиків струму використовувався окремий блок живлення. Параметри системи наведено у таблиці 3.1. Фотографії системи та електрична схема показані на рис. 3.2. Для живлення схеми мікропроцесорного модуля та датчиків струму використовувався окремий блок живлення. Параметри системи наведено у таблиці 3.1. Фотографії системи та електрична схема показані на рис. 3.2.

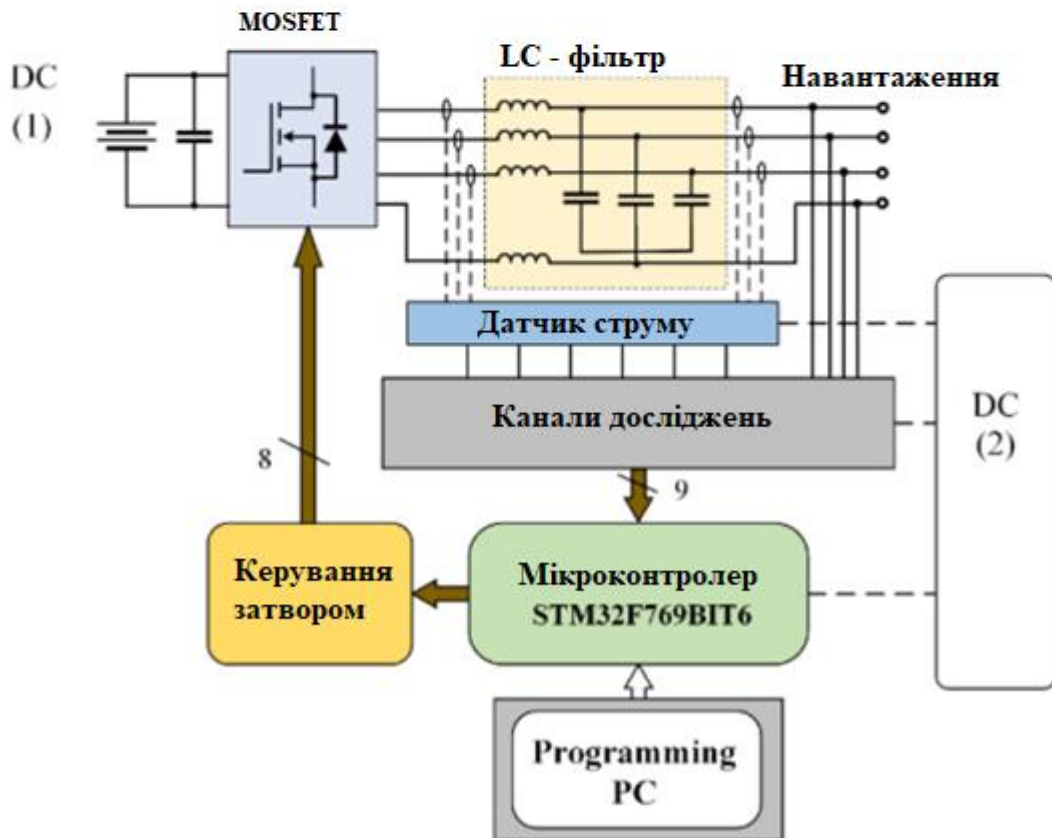
Завдяки оптимізації часу, виконаної для запропонованого алгоритму КПМ, досягнутий час обчислення запропонованого алгоритму дорівнює 134 мкс для алгоритму нормального режиму і 185 мкс для алгоритму аварійного режиму. Для наявного в лабораторії мікропроцесора період вибірки для алгоритму нормального режиму обраний рівним 25 мкс, а алгоритму аварійного режиму - 32 мкс.

Таблиця 3.1. Парметри системи

Параметр	Значення
DC input power supply	$V_{dc}=60 \text{ V}$, $P_{dc} = 720 \text{ Watt}$
Sampling time	$T_s = 25 \mu\text{s} / 32 \mu\text{s}$
DC-link capacitance	$C_{dc}=800 \mu\text{F}$
LC filter	$R = 0.1 \Omega$, $L = 1 \text{ mH}$, $C = 90 \mu\text{F}$



(a)



(б)

Рисунок 3.2. Експериментальна установка (а) та її функціональна схема (б)

Для оцінки продуктивності алгоритму було проведено тестування в трьох режимах: статичний режим роботи, перехідні процеси і режим короткого

замикання. Кожен із режимів роботи був перевірений за різних параметрів навантаження.

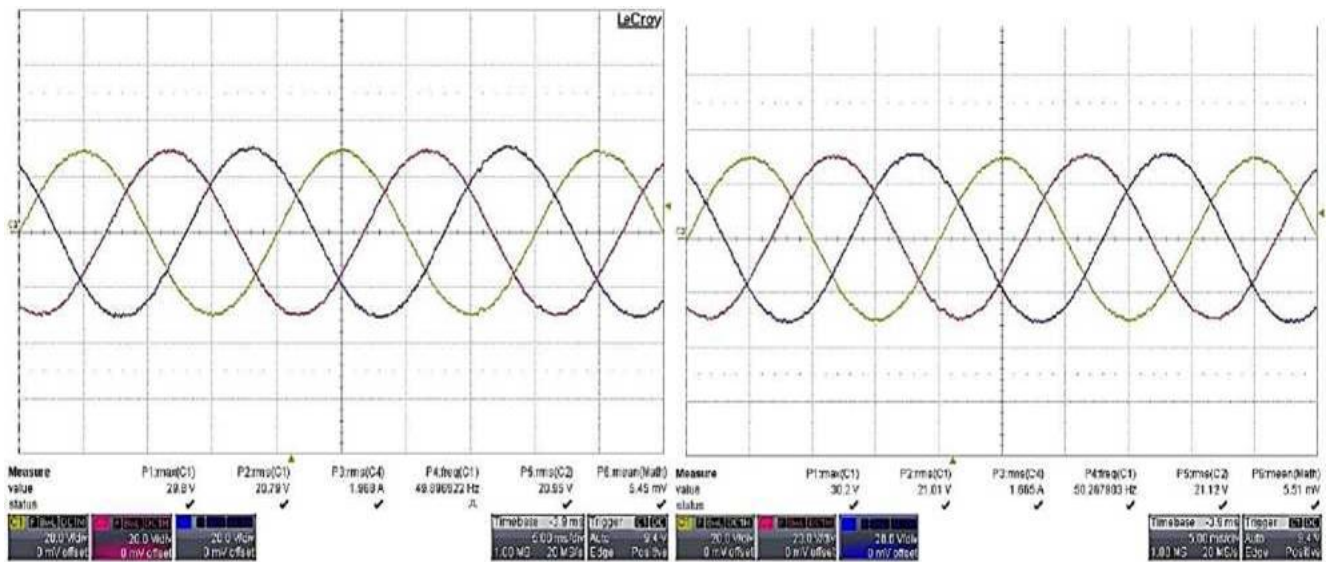
3.2.1 Статичний режим

Робота алгоритму керування в статичному режимі була перевірена за різних видів навантажень, представлених у таблиці 3.2:

Таблиця 3.2. - Параметри навантаження

Дослід	Параметри навантаження
1) Збалансовані резистивні навантаження	$R_a = R_b = R_c = 10 \Omega$
2) Збалансовані індуктивні навантаження	$R_a = R_b = R_c = 12 \Omega$ $L_a = L_b = L_c = 4 \text{ мГ}$
3) Незбалансовані резистивні навантаження	$R_a = 5 \Omega, R_b = 10 \Omega, R_c = 15 \Omega$
4) Незбалансовані індуктивні навантаження	$R_a = 6 \Omega, R_b = 9 \Omega, R_c = 12 \Omega$ $L_a = 2 \text{ мГ}, L_b = 3 \text{ мГ}, L_c = 4 \text{ мГ}$
5) Незбалансовані нелінійні навантаження	Дослід(а): $L_f = 1.3 \text{ мГ}, C_f = 1400 \mu\text{F}, R_a = 10 \Omega,$ Дослід(б): $L_f = 13.5 \text{ мГ}, C_f = 2800 \mu\text{F}, R_a = 10 \Omega$

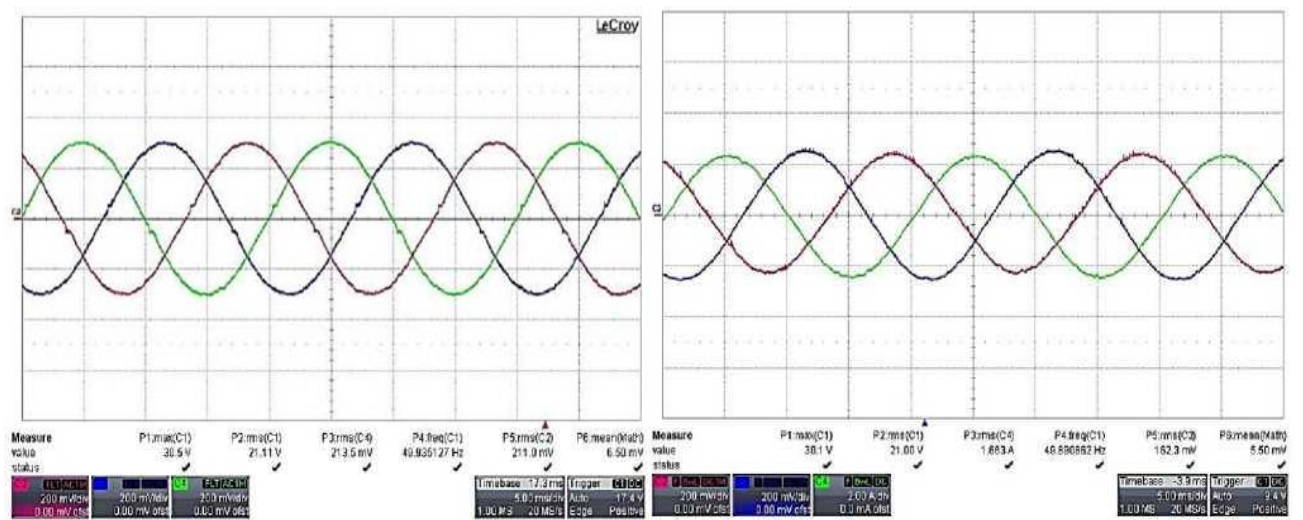
Осцилограми напруги навантаження, струмів навантаження та струму нульового дроту при збалансованих навантаженнях показані на рисунках 3.3а – 3.5а. Відповідні осцилограми напруги та струмів для індуктивного навантаження представлені на малюнках 3.3б – 3.5б. Отримані результати експериментів показують, що алгоритм здатний регулювати напругу незалежно від типу навантаження (резистивне або індуктивне). У разі індуктивного навантаження не вдалося в лабораторних умовах досягти ідеального балансу струмів, тому струм нульового дроту не дорівнює нулю у цьому випадку. Як резистивне навантаження використовувалося електронне навантаження, що дозволило звести несиметрію до мінімуму.



a)

(б)

Рисунок 3.3 - Напруги навантаження СЕС при (а) збалансованих резистивних навантаженнях та (б) збалансованих індуктивних навантаженнях



a)

(б)

Рисунок 3.4 - Струми навантаження СЕС при (а) збалансованих резистивних навантаженнях та (б) збалансованих індуктивних навантаженнях

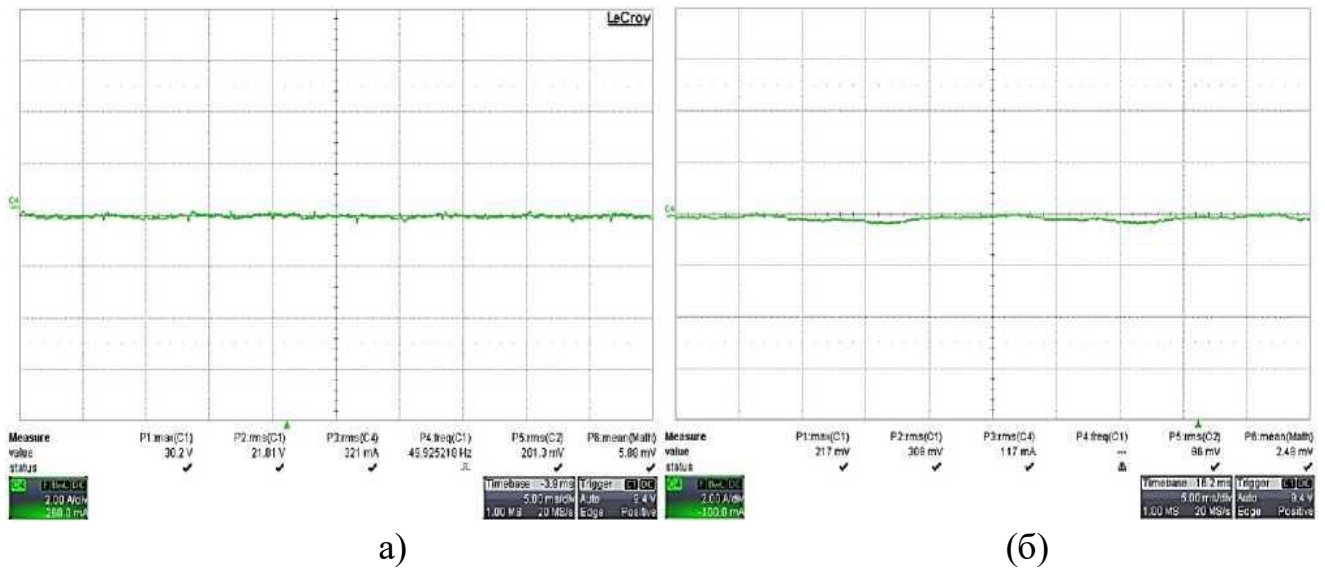


Рисунок 3.5 - Струм нульового дроту СЕС при (а) збалансованих резистивних навантаженнях та (б) збалансованих індуктивних навантаженнях

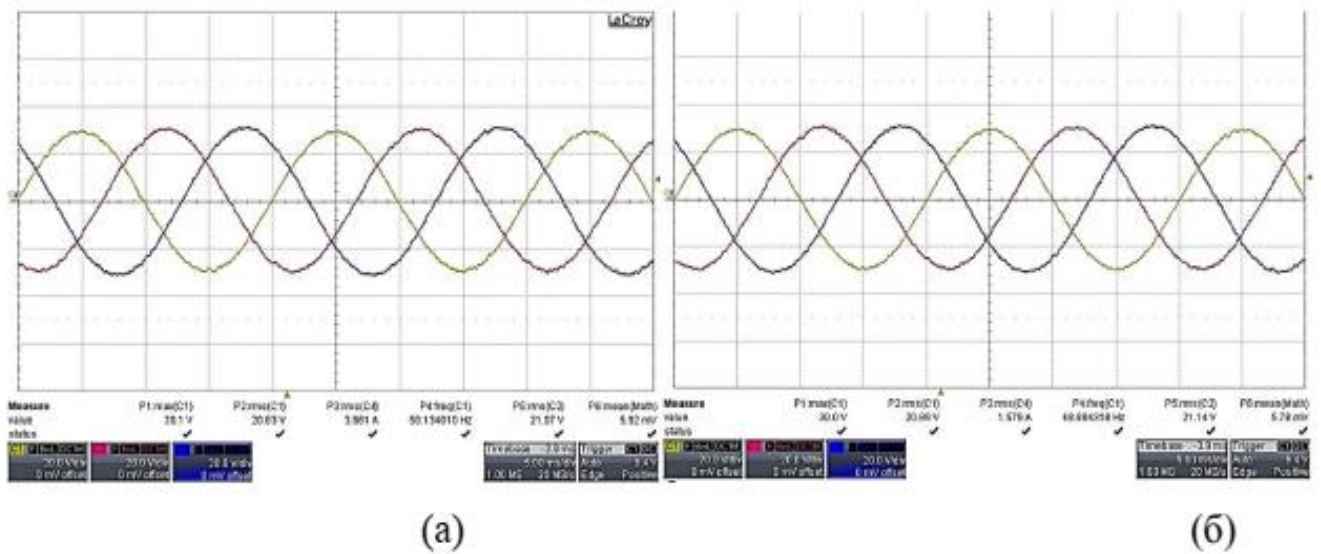


Рисунок 3.6 - Напруга навантаження СЕС при (а) незбалансованих резистивних навантаженнях та (б) незбалансованих індуктивних навантаженнях

У разі незбалансованого навантаження алгоритм здатний керувати інвертором напруги так, щоб забезпечити збалансовану напругу навантаження (рис. 3.6). Напруги навантаження досить точно йдуть за еталонними напругами, є синусоїдальними з низьким значенням гармонійних спотворень. Як показано на рис. 3.7, струми навантаження різні та визначаються повним опором навантаження кожної окремої фази, що викликає перебіг струму в нульовому дроті (рис. 3.8).

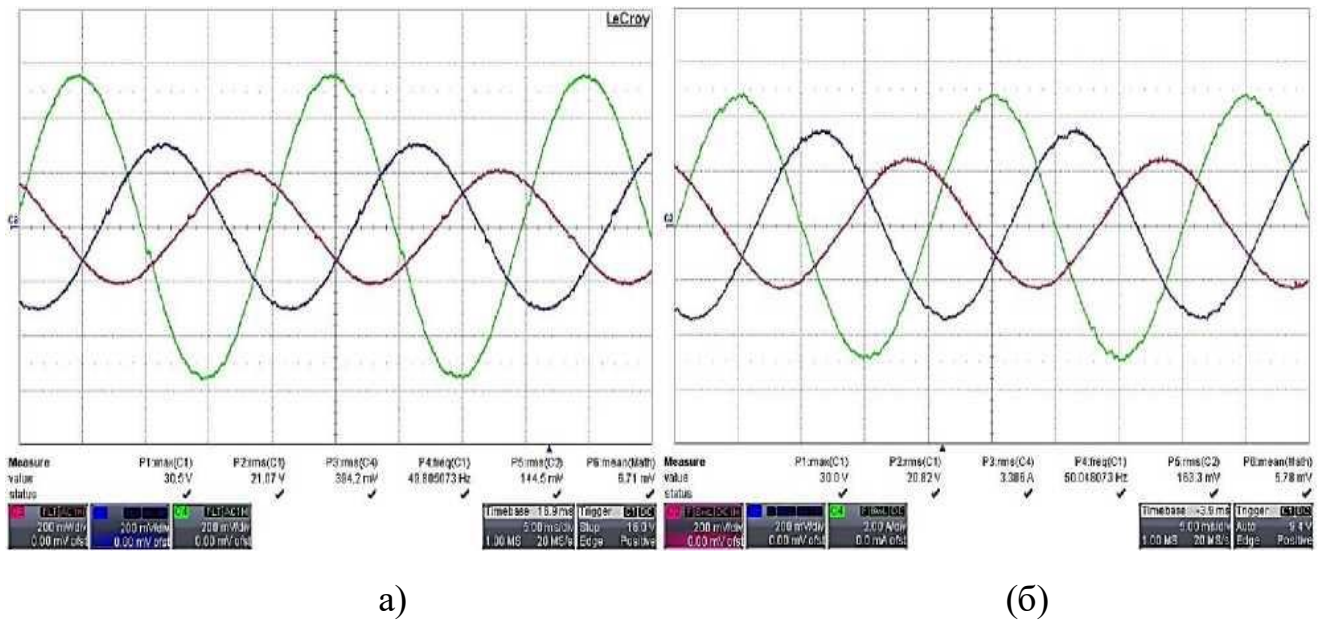


Рисунок 3.7 - Струми навантаження СЕС при (а) незбалансованих резистивних навантаженнях та (б) незбалансованих індуктивних навантаженнях

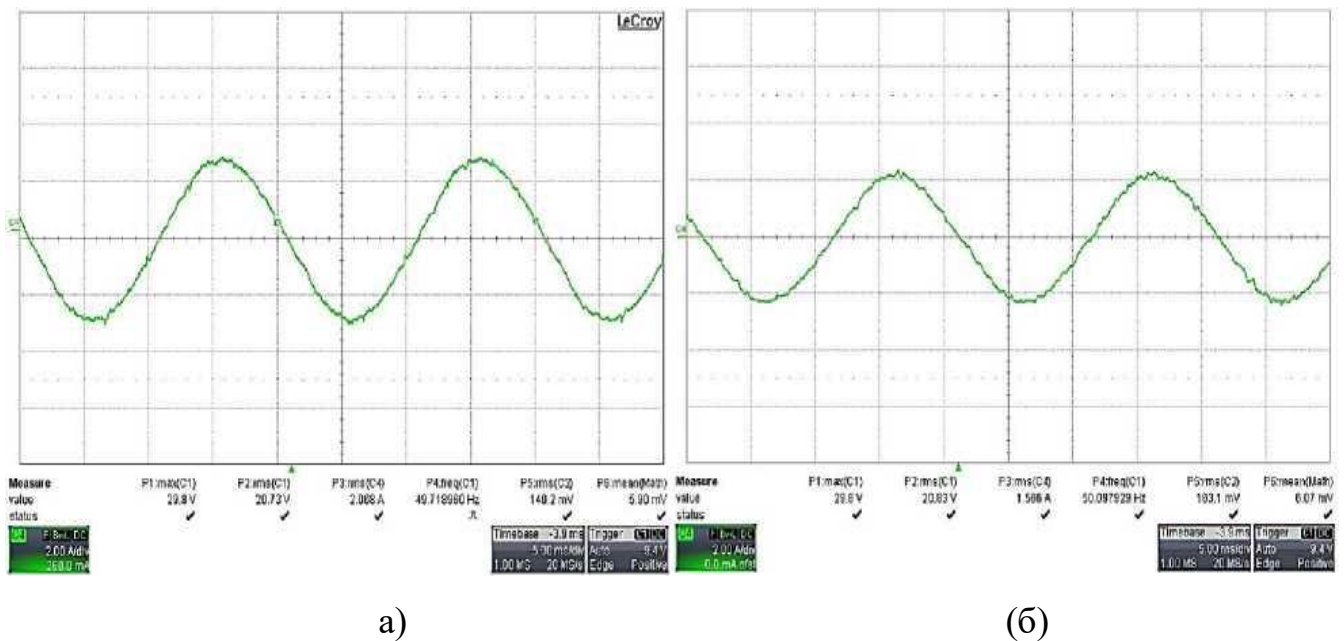


Рисунок 3.8. Струм нейтралі СЕС при (а) незбалансованих резистивних навантаженнях та (б) незбалансованих індуктивних навантаженнях

Для підтвердження працездатності алгоритму при нелінійних навантаженнях був проведений експеримент із роботою перетворювача на трифазний діодний міст із резистивним навантаженням та LC-фільтром. Схема навантаження показана рис. 3.9.

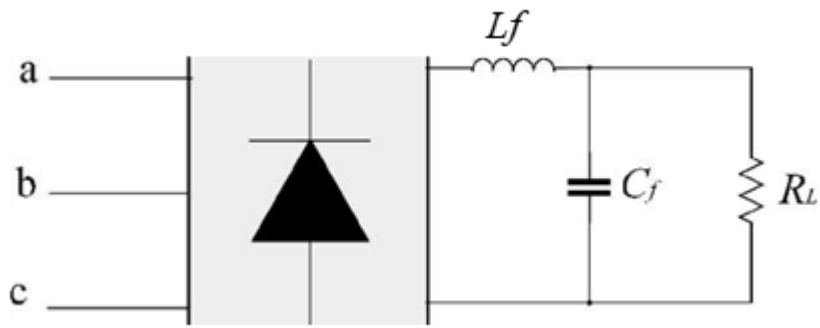


Рисунок 3.9 - Топологія нелінійного навантаження СЕС, що використовується в експерименті

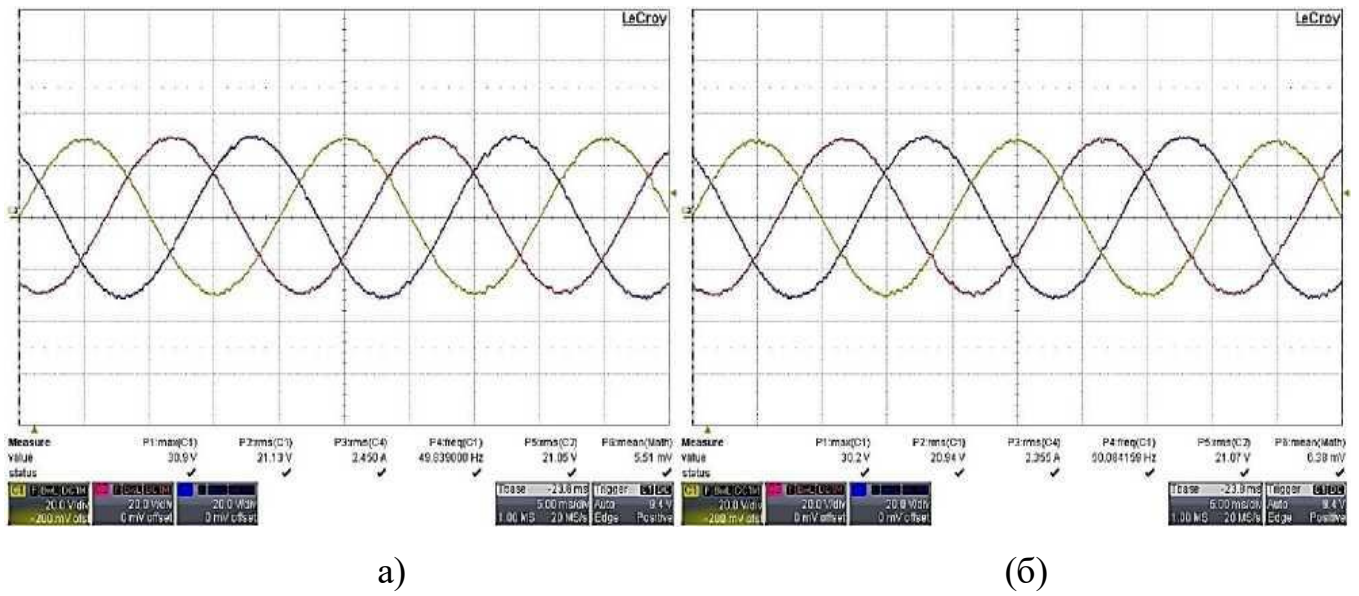


Рисунок 3.10 - Напруги навантаження СЕС при нелінійних навантаженнях: дослід (а) та дослід (б)

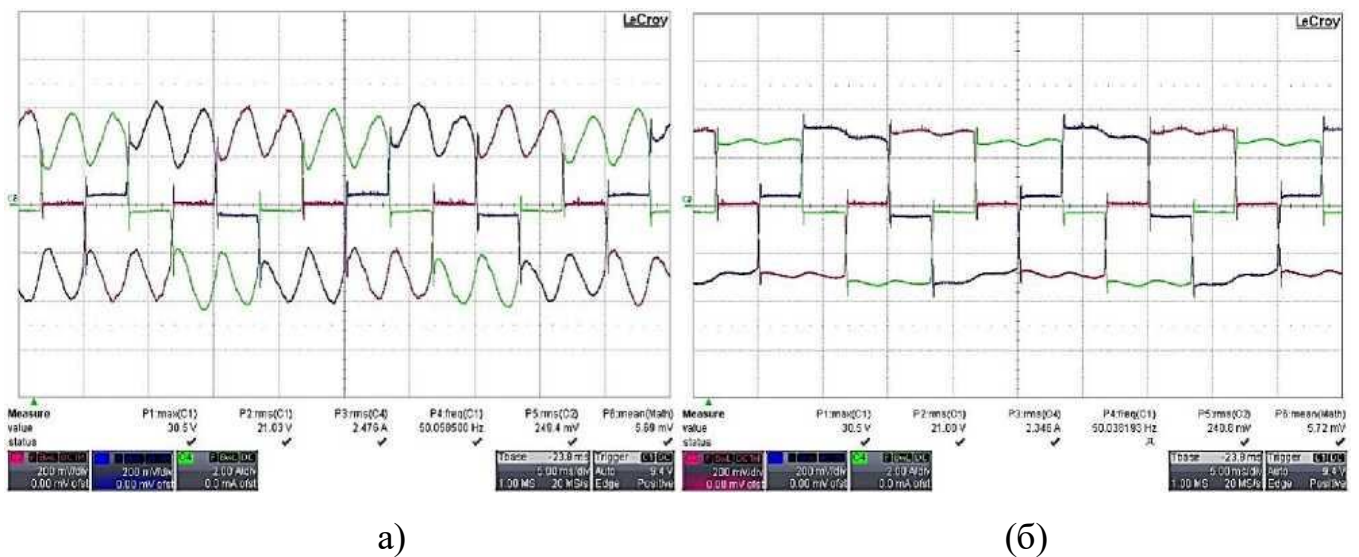


Рисунок 3.11 - Струми навантаження СЕС при нелінійних навантаженнях: дослід (а) та дослід (б)

Протягом експерименту був використаний LC-фільтр із різними параметрами (таблиця 3.2). Осцилограми фазних напруг та струмів фаз показані на рис. 3.10 та рис. 3.11 відповідно. Незважаючи на те, що споживані навантаженням струми мають несинусоїдальну форму, фазні напруження продовжують точно відстежувати еталонні напруження і залишаються синусоїдальними з низьким значенням гармонічних спотворень.

3.2.2 Динамічний режим

Для практичної перевірки роботи СЕС у динамічному режимі застосовувалася ступінчаста зміна опору навантаження від холостого ходу до наступних значень: $R_a = R_b = R_c = 10 \text{ Ом}$ через 0,2 секунд після старту перетворювача. Напруги та струми навантаження показані на рисунках 3.12 та 3.13 відповідно.

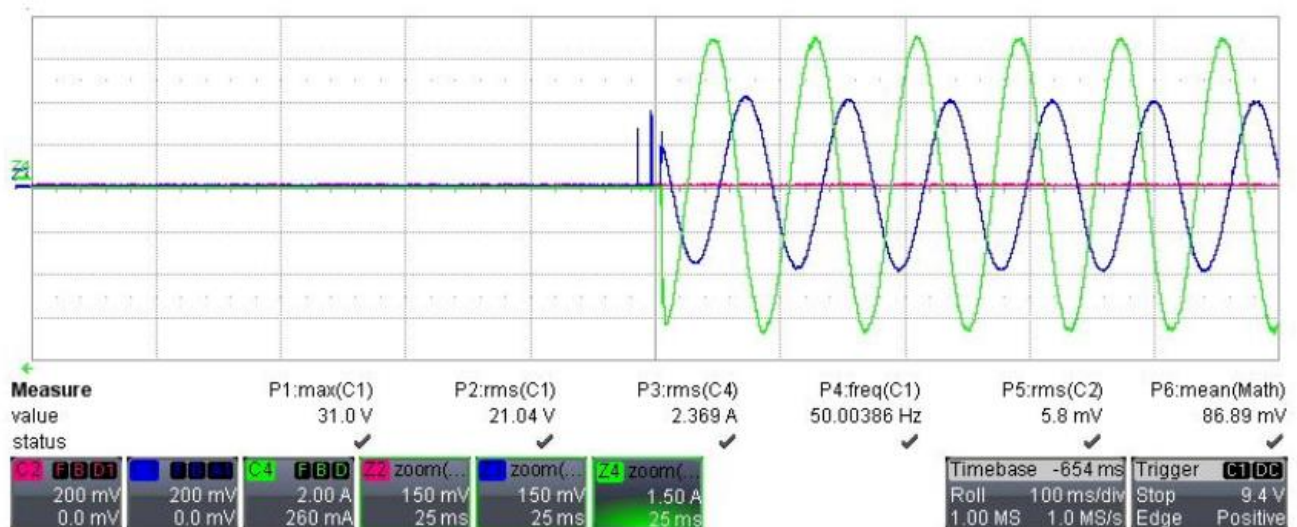


Рисунок 3.12 - Струми навантаження СЕС в динамічному режимі

Результати експерименту показують, що амплітуди фазної напруги залишаються незмінними після підключення навантаження. Понад те, перехідний процес закінчується приблизно 2 мс, що прийнятним результатом. Спотворення фазних напруг також знаходяться на прийнятному рівні. Як можна помітити, протягом перехідного процесу спостерігається дерен у кривих струму навантаження. Однак це явище не впливає на фазні напруги, які точно йдуть за еталонними сигналами завдання.

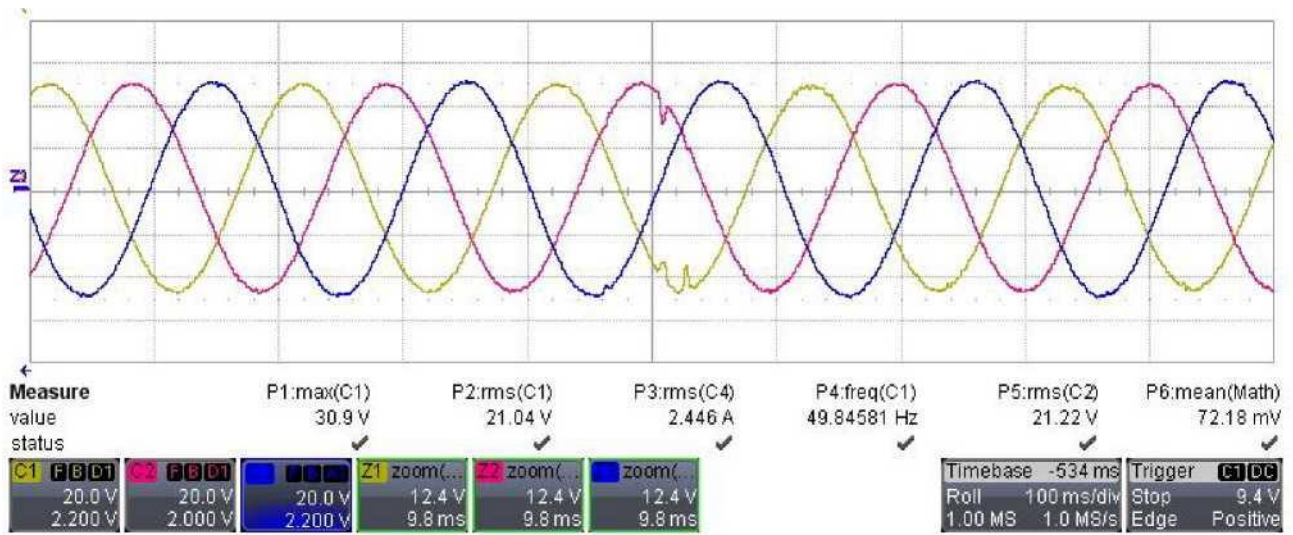


Рисунок 3.13 - Напряга навантаження СЕС у динамічному режимі

3.2.3 Аварійні режими

У загальному випадку існує три типи аварійних режимів, які можуть статися в будь-якій системі електропостачання:

- 1- однофазне коротке замикання;
- 2- лінійне коротке замикання;
- 3- трифазне симетричне коротке замикання.

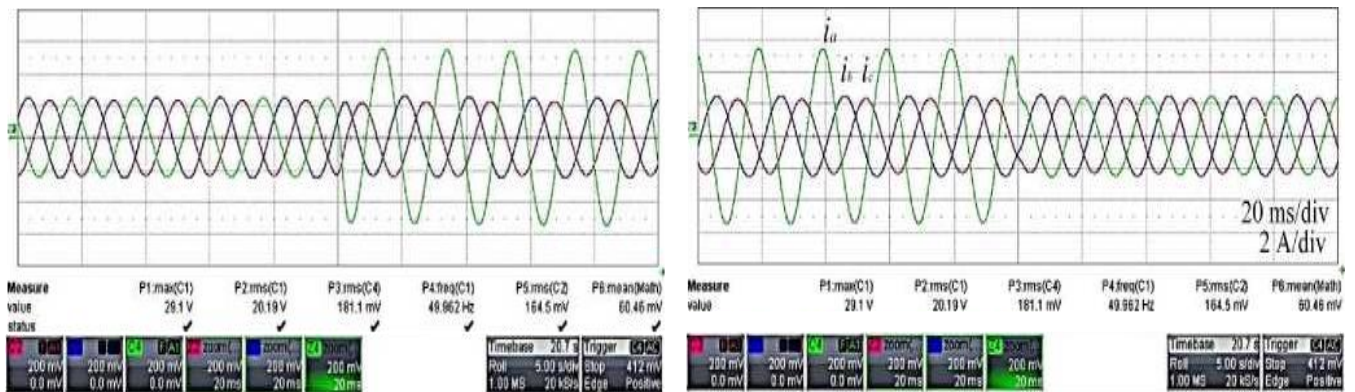


Рисунок 3.14 - Струм навантаження до однофазного КЗ, протягом однофазного КЗ та після.

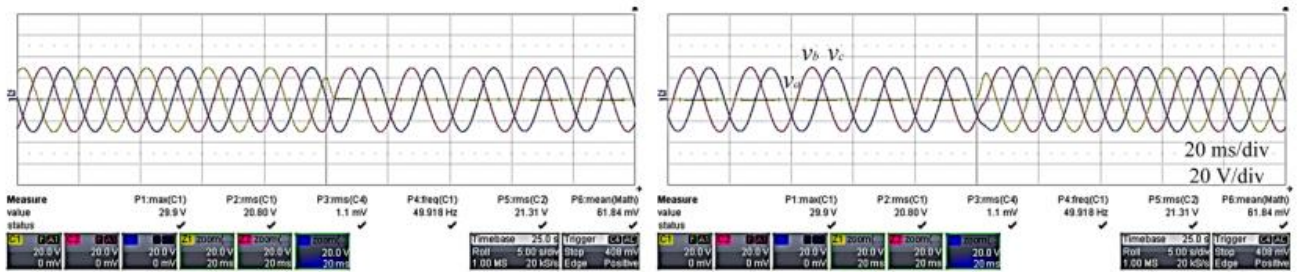


Рисунок 3.15 - Напряга навантаження до однофазного КЗ протягом однофазного КЗ і після

Робота алгоритму керування була перевірена експериментально на всіх типах аварійних ситуацій, щоб показати ефективність роботи алгоритму та можливість обмеження струму. Коротке замикання з боку навантаження було проведено за допомогою автоматичного контактора, підключеного паралельно з навантаженням, від 1 до 3 секунд.

Струми навантаження протягом однофазного замикання у фазі А показані на рис. 3.14. Як видно з малюнка осцилограми, струм у фазі А обмежений на рівні 7 ампер і має синусоїдальну форму відповідно до еталонного сигналу завдання струму, тоді як інші фази працюють незалежно в режимі регулювання напруги. Як видно на рис. 3.15 осцилограми, коротке замикання у фазі А ніяк не впливає на їхню роботу. Після виходу зі стану КЗ напруга у фазі приходить у нормальний стан без перенапруг під час перехідного процесу.

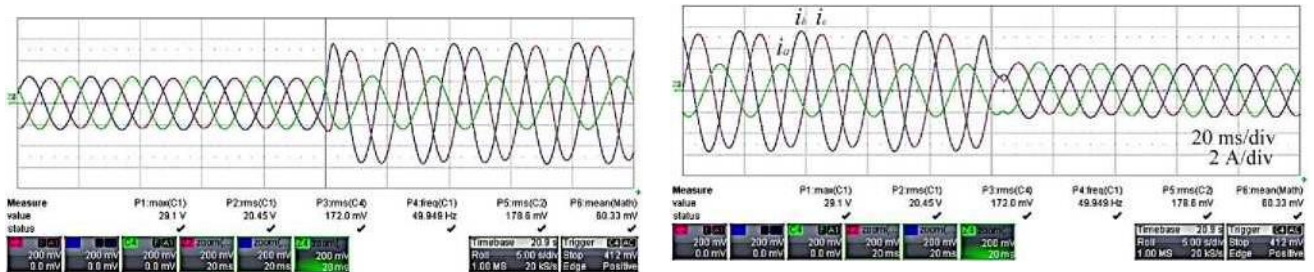


Рисунок 3.16 - Струм навантаження до двофазного КЗ, протягом двофазного КЗ та після

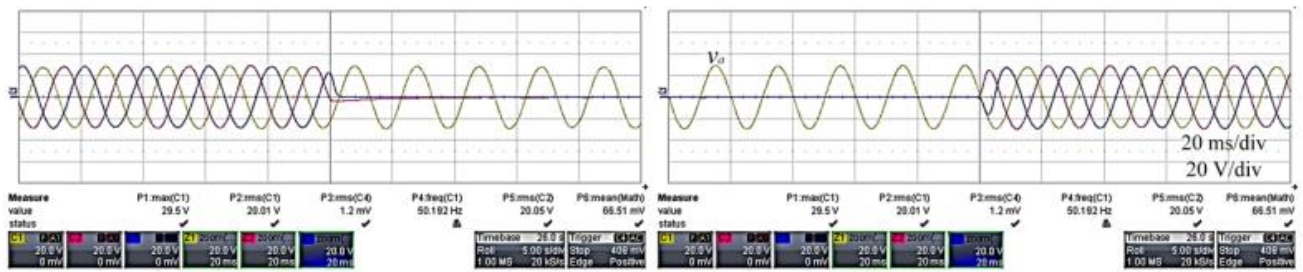


Рисунок 3.17 - Напряга навантаження до двофазного КЗ, протягом двофазного КЗ та після

Розроблений алгоритм керування показує таку ж продуктивність і у разі двофазного короткого замикання як показано на рисунках 3.16 і 3.17. Струми у фазах з КЗ обмежені та мають синусоїдальну форму відповідно до еталонного сигналу завдання струму. Робота справної фази не порушується. Режимми однофазного та двофазного КЗ вважаються випадками незбалансованого короткого замикання, у яких алгоритм дозволяє ефективно визначити фази, у яких сталася аварійна ситуації та змінити мету керування на обмеження струму навантаження, зберігши при цьому працездатність СЕС загалом та робочих фаз зокрема.

Однією з найнебезпечніших аварійних ситуацій у трифазних СЕС є трифазне симетричне замикання. Розроблений алгоритм керування дозволяє ефективно захистити систему електропостачання від кидка струму, змінивши мету керування регулювання напруги на регулювання струму. На рис. 3.18 показано, як інвертор, на основі якого побудована СЕС, формує навантаження заданий струм у всіх фазах протягом короткого замикання. У момент часу, коли СЕС виходить зі стану короткого замикання, і в час, коли здійснюється регулювання струму, можливе виникнення перенапруг. Тому алгоритм так само, як і в попередніх експериментах відстежує можливість появи перенапруг і уникає станів перемикання інвертора, які призводять до появи напруги вище, ніж граничне значення. Такий захист від перенапруг може призвести до деяких коливань напруги при виході інвертора зі стану короткого замикання, як показано на рис. 3.19, які, втім, не є критичними.

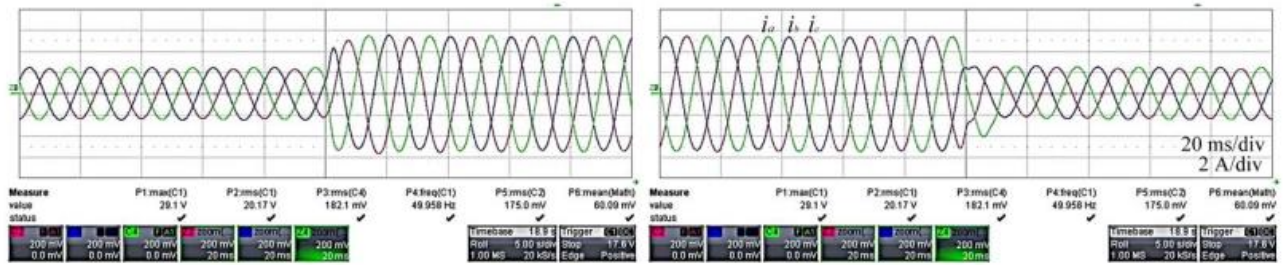


Рисунок 3.18 Струм навантаження до трифазного КЗ, протягом трифазного КЗ та після

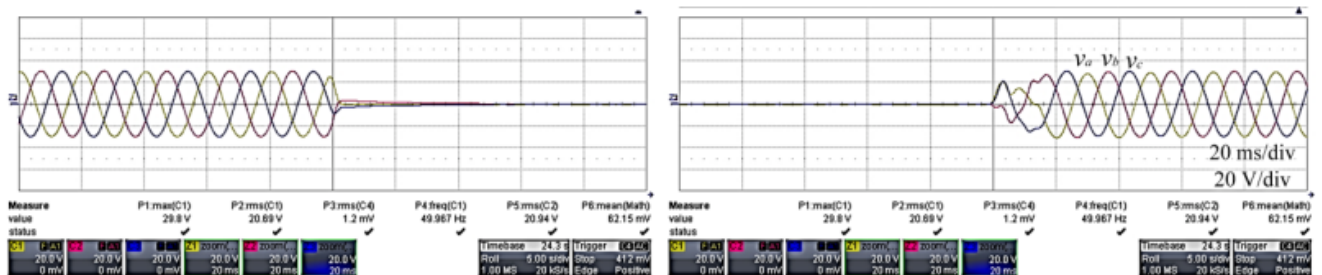


Рисунок 3.19. Напруга навантаження до трифазного КЗ, протягом трифазного КЗ та після

3.3 Висновки до розділу

Дослідження, проведені у розділі 3 показують, що алгоритм прогнозного керування (КПМ) ефективний при застосуванні трифазних системах електропостачання, реалізованих на основі напівпровідникового перетворювача (інвертора). Для перевірки теоретичних положень, сформульованих у цій роботі:

- 1) було доопрацьовано алгоритм КПМ для застосування в аварійних режимах роботи СЕС;
- 2) виготовлено макетний зразок напівпровідникової СЕС з нульовим проводом, на якому проведено фізичні експерименти;
- 3) в результаті проведених експериментів показано, що параметри вихідної напруги СЕС за показниками КНД та динамічного відгуку відповідають результатам, отриманим при імітаційному моделюванні.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Техніка безпеки при експлуатації електрообладнання та електромереж

До обслуговування електрообладнання допускаються особи не молодше 18 років, які не мають медичних протипоказань, що заважають виконанню робіт, що отримали вступний і первинний інструктажі на робочому місці, виробниче навчання, перевірку знань.

Електромонтер повинен знати схему електропостачання об'єктів виробництва, повинен мати навички прийомів технічних методів обслуговування електроустановок. Він забезпечується усіма засобами індивідуального захисту та спецодягом. Інструменти і засоби захисту повинні бути випробувані, справні та використовуються за призначенням [13, с. 76].

При експлуатації діючих електроустановок застосовують електрозахисті засоби та запобіжні пристосування. Ручне включення і відключення устаткування напругою понад 1000 В необхідно виконувати в діелектричних рукавичках, колошах або на килимку. Відключення виконують таким чином: відключають роз'єднувачі, знімають плавкі вставки запобіжників, від'єднують привод мережі. Після вивішування плаката перевіряють відсутність напруги на відключеній ділянці мережі. В оперативному журналі роблять запис про відключення. Включення проводять тільки після відмітки в журналі про закінчення робіт із зазначенням відповідальної особи.

Безпека виконання забезпечується також організаційними заходами. До них відноситься оформлення роботи нарядів, оформлення допуску до роботи, нагляд під час виконання роботи.

Наряд є письмовим дозволом на роботу в електроустановках, що визначає місце, час, початок і закінчення робіт; умови безпечного його

проведення, склад бригади та осіб, відповідальних за безпеку. Без наряду по усному чи письмовому розпорядженню, але з обов'язковим записом в журналі можуть виконуватися такі роботи, як прибирання приміщень до огороження

електрообладнання, чистка кожухів, доливка масла в підшипники, догляд за колекторами, контактними кільцями, щітками, заміна запобіжників. При роботі з електроустановками напругою до 1000 В без зняття напруги необхідно: захистити розташовані поблизу робочого місця інші струмовідні частини, що знаходяться під напругою, до яких можливий випадковий дотик; працювати в діелектричних калошах або стоячи на ізолюючій підставці, або на діелектричному килимі; застосовувати інструмент з ізолюючими рукоятками (у викруток, крім того, повинен бути ізольований стрижень), за відсутності такого інструменту користуватися діелектричними рукавичками.

При виконанні робіт без зняття напруги на струмовідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно: тримати ізолювальні частини засобів захисту за рукоятки до обмежувального кільця; розташовувати ізолюючі частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмоведучими частинами двох фаз чи замикання на землю; користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям.

При виявленні порушення лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту користування ними має бути негайно припинене.

Щозмінні огляди електрообладнання та мереж повинен проводити черговий електрик. При огляді слід звертати увагу на наступне: відсутність змін стану електрообладнання при його функціонуванні; ступінь корозії, фарбування труб, кріпильних елементів; справність вводів проводів та кабелів в електроустановку; справність заземлюючих пристроїв; наявність попереджувальних плакатів та знаків маркування на вибухонебезпечному електрообладнанні; наявність всіх передбачених конструкцією болтів, що кріплять елементи оболонки (вони повинні бути добре затягнуті); потрапляння на електрообладнання бризок, крапель і пилу.

При виявленні ненормальної роботи силового трансформатора черговий електрик повинен вивести його з роботи з обов'язковим дотриманням усіх заходів особистої безпеки, використовуючи необхідні засоби індивідуального захисту. Таке відключення проводиться при: сильному нерівномірному шумі і

потріскування всередині трансформатора; ненормальному і постійно зростаючому нагріванні трансформатора при номінальному навантаженні і роботі пристроїв охолодження; викид масла з розширювача або розриві діафрагми вихлопної труби; течі масла з пониженням його рівня нижче мінімально допустимого.

При цьому робиться запис в оперативному журналі і повідомляється відповідальному за електрогосподарство.

Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів і правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів вимагають проводити регулярні огляди та ремонт електромереж, а також вимірювання опору та ізоляції.

4.2 Дослідження стійкості роботи у надзвичайних ситуаціях підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі

Під стійкістю роботи об'єктів електротехнічної і світлотехнічної галузі розуміють його спроможність в умовах надзвичайної ситуації випускати продукцію в запланованому обсязі та номенклатурі, а при отриманні середніх руйнувань або порушенні зв'язків з кооперації та поставок відновлювати виробництво у мінімальні терміни.

Під стійкістю роботи об'єктів, які безпосередньо не виробляють матеріальні цінності розуміють їх спроможність виконувати свої функції в умовах НС.

На стійкість роботи об'єктів електротехнічної та світлотехнічної галузі в умовах НС впливають наступні фактори:

- надійність захисту робітників та службовців;
- спроможність інженерно-технічного комплексу об'єкта протистояти у визначеному ступеню уражаючих факторів стихійного лиха, аварій, катастроф та сучасних видів зброї;
- захищеність об'єкта від вторинних уражаючих факторів (пожеж, вибухів, зараження отруйними речовинами);
- надійність системи забезпечення об'єкта всім необхідним для виробництва (сировиною, паливом, комплектуючими вузлами і деталями, електроенергією, водою, газом та іншим);

- стійкість та безперервність керування виробництвом та ЦО;
- підготовленість об'єкта до ведення РіНР та робіт щодо порушеного виробництва.

Захист робітників та службовців досягається чотирма основними способами:

- укриття людей в захисних спорудах;
- проведення евакозаходів;
- радіаційно-хімічний захист;
- медичний і біологічний захист.

Надійно захистити виробничий персонал об'єкта можливо лише при комплексному використанні усіх основних способів захисту.

Захист виробничих фондів полягає у підвищенні протидії будинків, споруд і конструкції об'єкта до уражаючих факторів та захисті технологічного обладнання, верстатів, систем і комунікацій та інших засобів, що формують основу виробничого процесу.

Створення надійних систем електро-, водо- та теплозабезпечення об'єктів:

а) підвищення стійкості електрозабезпечення:

- розподіл схеми електромереж на незалежно працюючі частини;
- за кільцювання електромереж та підключення їх до декількох джерел енергозабезпечення;
- створення резерву дизельних електростанцій;

б) підвищення стійкості систем водопостачання:

- водопостачання від двох незалежних джерел, одне з яких підземне;
- захист вододжерел та резервуарів чистої води;
- створення обвідних (байпасних) ліній навколо водонапірних веж;

в) підвищення стійкості систем газу, тепло- та паливо- забезпечення:

- розподільні газопроводи робити підземними та передбачати їх кільцювання;
- газорозподільні станції та опорні пункти обвідних газопроводів передбачати в підземному варіанті;
- встановлювати в основних вузлових точках систем автоматичні вимикаючі пристрої, які спрацьовують при аваріях.

Підвищення протипожежної стійкості:

- максимальне скорочення запасів палива та вибухонебезпечних речовин;
- проведення профілактичних протипожежних заходів;
- підготовка сил і засобів пожежогасіння.

Створення стійкості системи матеріально-технічного постачання. На об'єктах електротехнічної і світлотехнічної галузі створюють запаси сировини, палива, комплектуючих вузлів і деталей, обладнання, які дозволяють продовжувати роботу на випадок дезорганізації постачання.

Створення стійкості системи керування:

- підготовка ПУ (захищених);
- забезпечення ПУ засобами зв'язку;
- використання автоматизованої системи керування. Підготовка до прискореного (негайного) відновлення порушеного виробництва;
- розробка необхідної технічної та технологічної документації;
- створення запасів матеріальних засобів для встановлення робіт;
- розробка розрахунків сил і засобів для відновлюючих робіт;
- визначення вірогідної черговості робіт по відновленню виробництва з урахуванням наявних ресурсів та місцевих умов.

Крім того, на стійкість роботи підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі буде впливати наявність підготовленої робочої сили.

Підвищення надійності та оперативності керування виробництвом:

- створення на об'єкті стійкої системи зв'язку;
- висока підготовка керівного складу;
- своєчасне прийняття вірних рішень та постановка завдань підлеглим у відповідності до обстановки, що склалася.

Підвищення стійкості роботи об'єкта електротехнічної та світлотехнічної галузі досягається завчасним проведенням комплексу інженерно-технічних, технологічних та організаційних заходів, які спрямовані на максимальне зниження дії уражаючих факторів і створення умов для ліквідації наслідків НС.

Інженерно-технічні заходи – це комплекс робіт, що забезпечують підвищення стійкості виробничих будинків і споруд, обладнання, комунально-енергетичних систем.

Технологічні заходи забезпечують підвищення стійкості роботи об'єкті шляхом зміни технологічного процесу, що сприяє спрощенню виробництва продукції та усуває можливість виникнення вторинних уражаючих факторів.

Організаційні заходи передбачають розробку і планування дій керівного командно-начальницького складу штабу, служб і формування ЦО при захисті робітників і службовців, проведенні РІНР, відновленні виробництва.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У представленій кваліфікаційній роботі можна зробити наступні висновки:

– виконано дослідження режимів роботи напівпровідникової трифазної СЕС на базі напівпровідникового перетворювача (інвертора), що реалізує алгоритм прогнозуючого керування. Проведені дослідження показали реалізованість, ефективність та перспективність застосування вищезазначеного алгоритму для досягнення необхідної якості вихідної напруги. В результаті виконаних у роботі досліджень.

– вивчено та проаналізовано особливості застосування та побудови автономних напівпровідникових СЕС при роботі на різні види навантажень та у складі автономних мереж, зокрема, microgrid.

– розроблено алгоритм прогнозуючого керування вихідною напругою АІН з нульовим проводом, що мінімізує помилку між вихідною та опорною напругою.

– У пакеті Matlab Simulink розроблена імітаційна модель СЕС при керуванні автономним інвертором з нульовим проводом на основі трьох методів керування: з ПР-регулятором, ПІД-регулятором та з прогнозуючою моделю.

– проведено порівняльні дослідження СЕС з прогнозуючим керуванням, що функціонують на основі алгоритмів пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) та пропорційно-резонансного (ПР)-регулювань.

– Розроблено алгоритми аварійного захисту напівпровідникової СЕС з прогнозуючим керуванням струму навантаження.

– Для перевірки теоретичних досліджень та висновків виготовлено макетний зразок напівпровідникової СЕС з нульовим проводом, на якому проведено експерименти.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина; ИНЭИ РАН – Московская школа управления СКОЛКОВО – Москва, 2019. – 210 с. - ISBN 978-5-91438-028-81.
2. Vaclav Smil, Energy Transitions: History, Requirements, Prospects (Santa Barbara, Calif.: Praeger, 2010), vii. For alternative definitions, see Benjamin K. Sovacool, «How Long Will It Take. Conceptualizing the Temporal Dynamics of Energy Transitions», Energy Research & Social Science, vol. 13, 2016, 202-203.
3. Smil, Vaclav. Energy and Civilization: a History. MIT Press, 2018. 4. <https://irena.org/newsroom/pressreleases/2018/Oct/Egypt-Could-Meet-Morethan-50-percent-of-its-Electricity-Demand-with-Renewable-Energy>.
5. <https://renen.ru/egypt-builds-largest-solar-park-2-gw/>
6. Zamora R, Srivastava AK. Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs. Renew Sustain Energy Rev 2010.
7. Palizban O, Kauhaniemi K. Hierarchical control structure in microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode. Renew Sustain Energy Rev 2015.
8. Vandoorn TL, De Kooning JDM, Meersman B, Vandeveldel L. Review of primary control strategies for islanded microgrids with power-electronic interfaces. Renew Sustain Energy Rev 2013.
9. Rocabert J, Luna A, Blaabjerg F, Rodríguez P. Control of power converters in AC microgrids. IEEE Trans Power Electron 2012.
10. Liu X, Deng Y, Liu Q, He X, Tao Y. Voltage unbalance and harmonics compensation for islanded microgrid inverters. IET Power Electron 2014.
11. X. Wang, J. M. Guerrero, F. Blaabjerg, and Z. Chen, “A review of power electronics based microgrids,” J. Power Electron., vol. 12, no. 1, pp. 181–192, 2012.
12. P. G. Arul, V. K. Ramachandramurthy, and R. K. Rajkumar, “Control strategies for a hybrid renewable energy system: A review,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 42, pp. 597–608, 2015.

13. A. Mohd, E. Ortjohann, D. Morton, and O. Omari, "Review of control techniques for inverters parallel operation," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 12, pp. 1477–1487, 2010.
14. S. B. and B. Chowdhury, "Hybrid AC / DC Power Distribution Solution for Future Space Applications," *Proc. IEEE PESGM*, vol. 65401, pp. 1–8, 2007.
15. Z. Jiang and X. Yu, "Hybrid DC- and AC-linked microgrids: Towards integration of distributed energy resources," *2008 IEEE Energy 2030 Conf. ENERGY 2008*, 2008.
16. Z. Chen, J. M. Guerrero, F. Blaabjerg, and S. Member, "A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 8, pp. 1859–1875, 2009.
17. Абуэлсауд Р.С. Устранения мёртвого времени для трёхфазных автономных инверторов напряжения / Р. С. Абуэлсауд, А. Г. Гарганеев // *Электропение – 2019. – № 1.*
18. Peng Li, Bai Dan, Kang Yong, and Chen Jian, "Research on three-phase inverter with unbalanced load," in *Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04.*, 2004, vol. 1, no. C, pp. 128–133.
19. D. Soto, C. Edrington, S. Balathandayuthapani, and S. Ryster, "Voltagebalancing of islanded microgrids using a time-domain technique," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 84, no. 1, pp. 214–223, 2012.
20. P. K. Goel, B. Singh, S. S. Murthy, and N. Kishore, "Isolated wind-hydro hybrid system using cage generators and battery storage," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 4, pp. 1141–1153, 2011.