

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **О. КОЛЛАРОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2023 р.

Кваліфікаційна робота
магістра

на тему Розробка заходів з поліпшення роботи інверторів на базі силової електроніки при їх використанні в енергетичних системах

Виконав студент 2 курсу, групи ЕЛКМ-22
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

_____ **Дмитро СТЕЛЬМАШ**

(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Керівник _____ **к.т.н., доц., М. РОМАНЮК**

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

_____ (підпис)

Нормоконтроль:

_____ **Е. НЕМЦЕВ**

(підпис)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

_____ (дата)

_____ (дата)

ЛУЦЬК – 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

«_____» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Дмитру СТЕЛЬМАШУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Розробка заходів з поліпшення роботи інверторів на базі
силової електроніки при їх використанні в енергетичних системах

керівник роботи Микола РОМАНЮК, канд. техн. наук, доцент
(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 11 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Напруга живлення інвертора – 48 В;
повна потужність на навантаженні – 2000 В·А; лінійна напруга на
навантаженні – 220 В, частота в лінії навантаження – 50 Гц, коефіцієнт
потужності навантаження – 0,85; частота перемикавання силових елементів –
0,06 Гц; значення коефіцієнта потужності інвертора – 0,8; коефіцієнт
модуляції – 0,95; частота комутації – 10000 Гц; температура корпусу
тепловідвідної пластини – 80 °С; температура охолоджуючого повітря –
40 °С; гранична температура – 120 °С; тип силового елемента – IGBT,
максимальне значення коефіцієнта несунусоїдності – 5%.

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

1. Огляд відомостей про місце інверторів в енергетичних системах.

2. Визначення впливу гармонічних складових в енергосистемах від роботи інверторів.

3. Розробка заходів щодо поліпшення роботи інверторів на основі силовій електроніки.

4. Розрахунок трифазного інвертора.

5. Моделювання роботи інвертора.

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

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 4	М. РОМАНЮК, доц. каф.		
Нормоконтроль	Е. НЄМЦЕВ		

7. Дата видачі завдання 2 жовтня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	02.10.23 – 15.10.23	
2.	Розділ 2	16.10.23 – 29.10.23	
3.	Розділ 3	30.10.23 – 12.11.23	
4.	Розділ 4	15.04.23 – 03.12.23	
5.	Розділ 5	04.12.23 – 10.12.23	
6.			

Студент _____
(підпис)

Дмитро СТЕЛЬМАШ _____
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Микола РОМАНЮК _____
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Дмитро СТЕЛЬМАШ. Розробка заходів з поліпшення роботи інверторів на базі силової електроніки при їх використанні в енергетичних системах / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2023.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У першому розділі наведено загальні відомості про інвертори в енергетичних системах, здійснено огляд проблем, з якими стикаються сучасні інверторні технології та огляд літературних джерел з питання, що досліджується.

У другому розділі була здійснена розробка заходів щодо поліпшення роботи інверторів на основі силової електроніки, визначено способи і принципи керування температурою, вплив гармонічних складових в енергосистемах від роботи інверторів, огляд питань забезпечення сумісності та стабільності та інші.

У третьому розділі здійснено розрахунок трифазного інвертора.

У четвертому розділі було здійснено конструювання та моделювання каскадного багаторівневого інвертора.

Ключові слова: інвертор, енергетична система, силова електроніка, гармоніки, сумісність, стабільність, силовий елемент, теплові втрати, каскадний багаторівневий інвертор, моделювання

SUMMARY

Dmytro STELMASH. Development of measures to improve the performance of inverters based on power electronics when used in energy systems / Graduation qualifying work for obtaining an educational level «master» in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Lutsk, 2023.

The thesis consists of an introduction, the main part, which includes four chapters, conclusions, a list of references and appendices.

The first chapter provides general information about inverters in power systems, an overview of the problems faced by modern inverter technologies and a review of literature on the issue under study.

In the second section, we develop measures to improve the operation of inverters based on power electronics, define the methods and principles of temperature control, the impact of harmonic components in power systems from inverter operation, review the issues of compatibility and stability, and others.

In the third section, the calculation of a three-phase inverter is carried out.

In the fourth section, the design and modeling of a cascaded multilevel inverter was carried out.

Keywords: inverter, power system, power electronics, harmonics, compatibility, stability, power element, heat losses, cascade multilevel inverter, modeling

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ІНВЕРТОРИ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ	10
1.1 Введення в інвертори в енергетичних системах	10
1.2 Огляд проблем, з якими стикаються сучасні інверторні технології	17
1.3 Огляд літературних джерел з питання, що досліджується	20
2 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ПОЛІПШЕННЯ РОБОТИ ІНВЕРТОРІВ НА ОСНОВІ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ	31
2.1 Загальні відомості покращення ефективності роботи інвертора	31
2.2 Способи і принципи керування температурою	32
2.3 Вплив гармонічних складових в енергосистемах від роботи інверторів	37
2.4 Огляд питань забезпечення сумісності та стабільності	42
2.5 Впровадження розширених принципів контролю	44
2.6 Використання принципів адаптації та модульності конструкцій інверторів	47
3 РОЗРАХУНОК ТРИФАЗНОГО ІНВЕРТОРА	49
3.1 Вихідні дані до розрахунку	49
3.2 Розрахунок і вибір силових елементів інвертора	49
3.3 Розрахунок і вибір конденсатора	54
3.4 Розрахунок теплових втрат у силових елементах	56
4 МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОРІВНЕВОГО ІНВЕРТОРА	60
4.1 Загальні відомості про багаторівневі інвертори	60

	7
4.2 Конструювання каскадного багаторівневого інвертора	61
4.3 Моделювання у прикладному середовищі Matlab_Simulink	62
ВИСНОВКИ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	71
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	76
ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	84

ВСТУП

Електричні приводи є основою багатьох виробничих систем і уособлюють у своїй роботі електричні, механічні та теплові процеси. Для керування цих систем досить широкого застосування знайшли інвертори, принцип роботи яких ґрунтується на промисловій електроніці. Основною функцією інверторів є взаємні перетворення змінного струму в постійний і навпаки з можливістю супутнього керування на певному етапі перетворення. Підвищення ефективності та експлуатаційної надійності перетворювачів можуть бути досягнуті шляхом застосування сучасних та передових технологій.

Оптимізація роботи інверторів полягає у пошуку та вирішенні проблем, пов'язаних з гармонічними спотвореннями та обмеженнями ефективності при енергетичних перетвореннях.

Вирішення зазначених проблем може стосуватися не тільки вдосконалення конструкції самих інверторів, але й удосконалення загальних принципів функціонування енергетичних систем. Сучасні технології в системах електроніки та системах управління можуть запропонувати перспективні шляхи для розширення меж роботи інверторів. Це можна зробити шляхом використання широкосмугових та високотемпературних пристроїв, впровадження більш складних електронних схем управління для кращої адаптаційні, що направлені на зменшення гармонічних проявів.

Можливості до удосконалення роботи інверторів в енергетичних системах є досить різноманітні, визначається технологічним прогресом, системними вдосконаленнями та впровадженням стратегії інтеграції. Наприклад, мінімізація гармонік може бути досягнута шляхом застосування активних і пасивних фільтрів та компенсуючих пристроїв.

Спільна робота інверторів з іншими компонентами енергетичної системи, схожа за поведінкою з електричними накопичувачами, що може бути використано для їх вдосконалення.

Покращення роботи інверторів починається від технологічних і простягається до системних стратегій, прагне до більш ефективних та надійних конструкцій. Модернізація та розвиток інверторів безперечно призведуть енергетичні системи до покращення енергетичних показників їх роботи та стійкості.

Мета роботи – розробити заходи з поліпшення роботи інверторів на базі силових електроніки.

Завдання роботи:

- визначити основні відомості про інвертори в енергетичних системах,
- здійснити огляд способів коригування коефіцієнта потужності,
- здійснити огляд проблем, з якими стикаються сучасні інверторні технології,
- розробити заходи щодо поліпшення роботи інверторів на базі силових електроніки,
- визначити вплив гармонічних складових в енергосистемах від роботи інверторів,
- розрахувати і вибрати силові елементи інвертора,
- здійснити моделювання багаторівневого інвертора.

Об'єкт досліджень – електричні процеси у інверторах на базі силових електроніки.

Предмет досліджень – параметри роботи інверторів на базі силових електроніки.

1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ІНВЕРТОРИ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

1.1 Введення в інвертори в енергетичних системах

Інвертори є одними з фундаментальних пристроїв в архітектурі сучасних енергетичних систем і виступають як [1]:

- критичні інтерфейси при перетворенні постійного струму у струм змінний,
- інтегруючі засоби у процесах, що поєднують енергетичні потоки з різних джерел, у тому числі відновлюваних,
- засоби ефективного управління приводними двигунами.

Особливе значення інверторів підкреслюється глобальним переходом до альтернативної енергетики, коли вони не тільки сприяють перетворенню сонячної та вітрової енергії в придатні для використання форми, але й відіграють ключову роль у підтримці стабільності та ефективності роботи енергетичної мережі. Інверторна технологія охоплює широкий спектр конструкцій і функціональних можливостей, які задовольняють різноманітні вимоги до живлення різних об'єктів. Здатність інверторів керувати та ефективно перетворювати енергію є ключовою для оптимізації продуктивності енергетичної системи, забезпечуючи ефективну інтеграцію енергії, виробленої з відновлюваних джерел, у мережу та забезпечення ефективного керування енергетичними потоками при управлінні [1].

Технічна складність інверторів пояснюється необхідністю застосування різних стратегій керування та використанням різноманітних силових електронних компонентів, що постійно вдосконалюються для підвищення їх ефективності, мінімізації втрат енергії при перетворенні та забезпечення надійної роботи за змінних умов навантаження. Провідні сучасні інвертори містять інтелектуальні технології, що забезпечують

моніторинг у реальному часі та здійснюють адаптивне керування, покращуючи їх здатність реагувати на динамічні прояви у мережі та сприяючи стабільній її роботі. Ця адаптивність має вирішальне значення у випадках, коли виробництво енергії є періодичним та/або непередбачуваним. Регулюючи напругу, частоту та якість електричної енергії, інвертори гарантують, що енергія, що подається в мережу або використовується локально, є постійною та надійною, нехтуючи такими проблемами, як коливання величини напруги або наявність гармонік [1].

Розвиток інверторної технології йде поряд з прогресом і досягненнями у дослідженнях напівпровідникових матеріалів, алгоритмами керування та системами управління температурними режимами. Це дозволяє розробляти більш компактні, ефективні та стійкі до зовнішніх збурень інвертори, що здатні працювати в суворих умовах навколишнього середовища, зберігаючи високу продуктивність. Інтеграція інтернет-технологій та штучного інтелекту в інверторні системи є ще одним кроком уперед, які дозволяють передбачити та спроектувати послідовність і періодичність технічного обслуговування, розширити можливості по управлінню енергією та наекономічнішу інтеграцію до існуючої архітектури електромереж [1].

Отже, інвертори – це не просто допоміжні компоненти енергетичних систем – вони є невід’ємною частиною принципів досягнення ефективності та функціональності енергетичних систем. За мірою того як світ тяжіє до більш стійких енергетичних рішень, роль інверторів стає все більш важливою, що вимагає розвитку та інновацій для задоволення існуючих викликів і нормативних вимог сучасних енергетичних структур (рис. 1.1 – 1.2) [2].

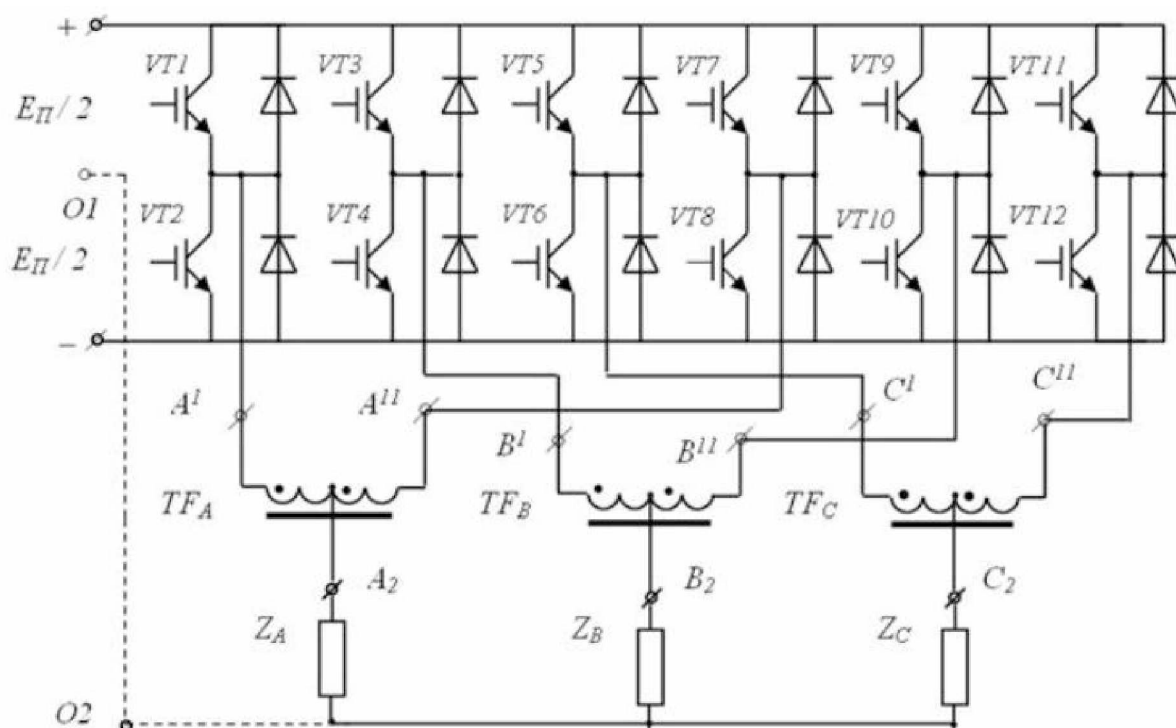


Рисунок 1.1 – Принципова електрична схема силової частини трифазного інвертора напруги з двоканальним перетворюючим трактом із підсумовуванням струмів каналів

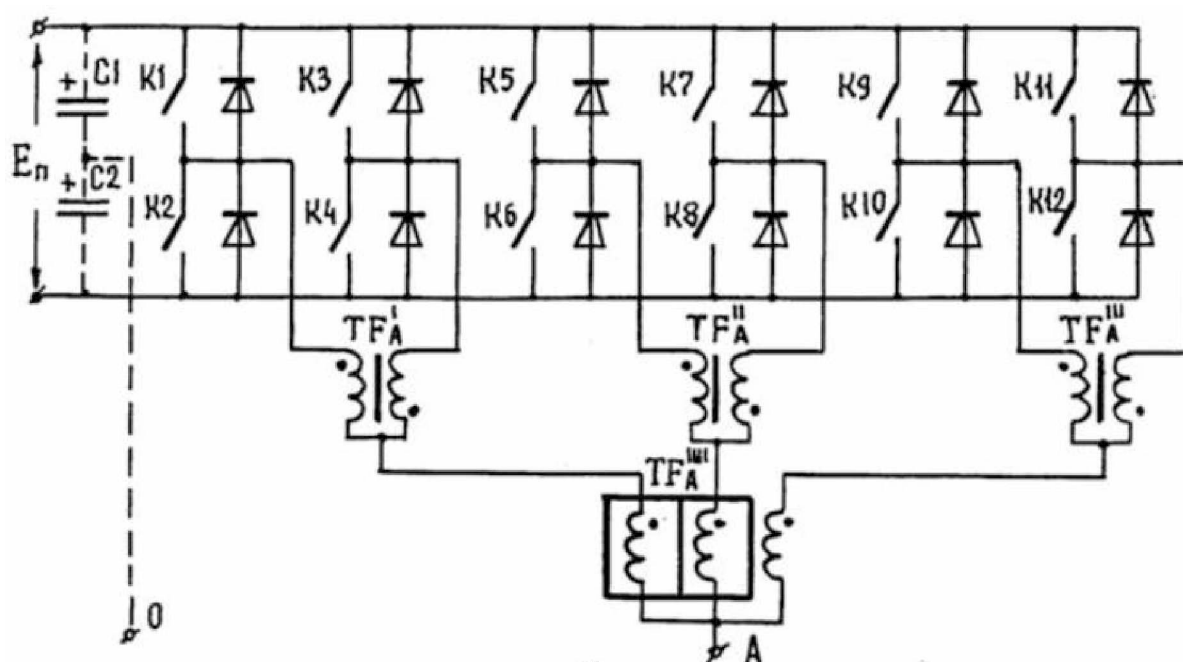


Рисунок 1.2 – Структурна схема безтрансформаторного однофазного інвертора напруги з 6-ти канальним перетворюючим трактом та підсумовуванням струмів каналів

Інвертори пройшли значну еволюцію з моменту свого створення, перейшовши від базових моделей до складних систем, невід'ємних для сучасних енергетичних систем. На початку інвертори мали досить просту структуру і призначались для перетворення постійного струму від акумуляторних батарей у змінний струм для малопотужних споживачів. Поява напівпровідників визначила переломний момент у розвитку інверторів – винахід тиристорів і транзисторів дозволив ефективніше та надійніше контролювати розподіл електричної потужності і конструювати більш складні інвертори з більшою потужністю. Також, роль інверторів значно розширилась з широким впровадженнями відновлюваних джерел енергії. Такі джерела в основному генерують постійний струм, що вимагало застосування ефективних методів перетворення його у змінний струм. Інвертори в таких системах не тільки перетворюють постійний струм в змінний, але й оптимізують вихідну потужність шляхом відстеження точки максимальної потужності, для досягнення найвищої ефективності [3].

Однією з основних проблем, з якою стикається інверторна технологія, є необхідність підтримувати стабільність роботи мережі та якість електропостачання. При збільшенні інтеграції відновлюваних джерел енергії, інвертори повинні не лише перетворювати електричну енергію, але й вирішувати проблеми, пов'язані з електричною частотою мережі, необхідністю регулювання напруги та корекції коефіцієнта потужності. Швидкий розвиток інверторних технологій також відображає мінливу динаміку та потреби у енергії. Поточні дослідження та розробки в цій галузі зосереджені на підвищенні ефективності, зменшенні розміру та вартості, а також покращенні функцій підтримки мережі у намаганні переходу до більш стійких та надійних енергетичних інфраструктур.

Інвертори в енергетичних системах служать основними компонентами, що узгоджують джерела постійного струму і мережі змінного струму. Це перетворення є не просто процесом і включає

складний процес модуляції, коли інвертор контролює амплітуду та фазу вихідних сигналів, щоб відповідати необхідним характеристикам потужності. Сучасні інвертори базуються на складних алгоритмах та методах керування для оптимізації процесу перетворення, гарантуючи те, що живлення, що подається, має не тільки відповідну напругу та частоту, але й підтримує якість з точки зору мінімальних гармонійних спотворень і високого коефіцієнта потужності. З точки зору типізації, інвертори дуже різноманітні, кожен з яких підходить для певних застосувань. Вибір того чи іншого типу інвертора залежить від різних факторів – розміру і потужності установки, вартості та бажаної гнучкості керування.

Інвертори стають все більше інтелектуальними пристроями, що інтегруються разом з технологіями розумних мереж. Вони здатні до забезпечення двостороннього зв'язку, що дозволяє їм не тільки подавати електричну енергію в мережу, але й реагувати на нормативні вимоги та умови роботи мережі. Це реалізується шляхом забезпечення таких функцій інверторів: зменшення пікових навантажень, завдяки зменшенню вихідної потужності, що дозволить зменшити навантаження на мережу і здійснити контроль реактивної потужності та підтримки визначеного рівня напруги в електричній мережі.

Крім того, розвиток силової електроніки дозволяє інверторам покращити свою ефективність і надійність. Використання «широкозонних» напівпровідників, таких як карбід кремнію і нітрид галію, дозволяє конструювати інвертори, що мають менші габарити і легші по масі, і демонструють менші втрати та вищу температурну стійкість. Це призводить до підвищення загальної продуктивності інверторних систем та подовження терміну їх служби. Здатність інверторів ефективно перетворювати та управляти енергією у поєднанні з їх провідною роллю в управлінні мережею та оптимізації системи підкреслює їх критичну важливість у сучасних енергетичних системах (рис. 1.3) [4].

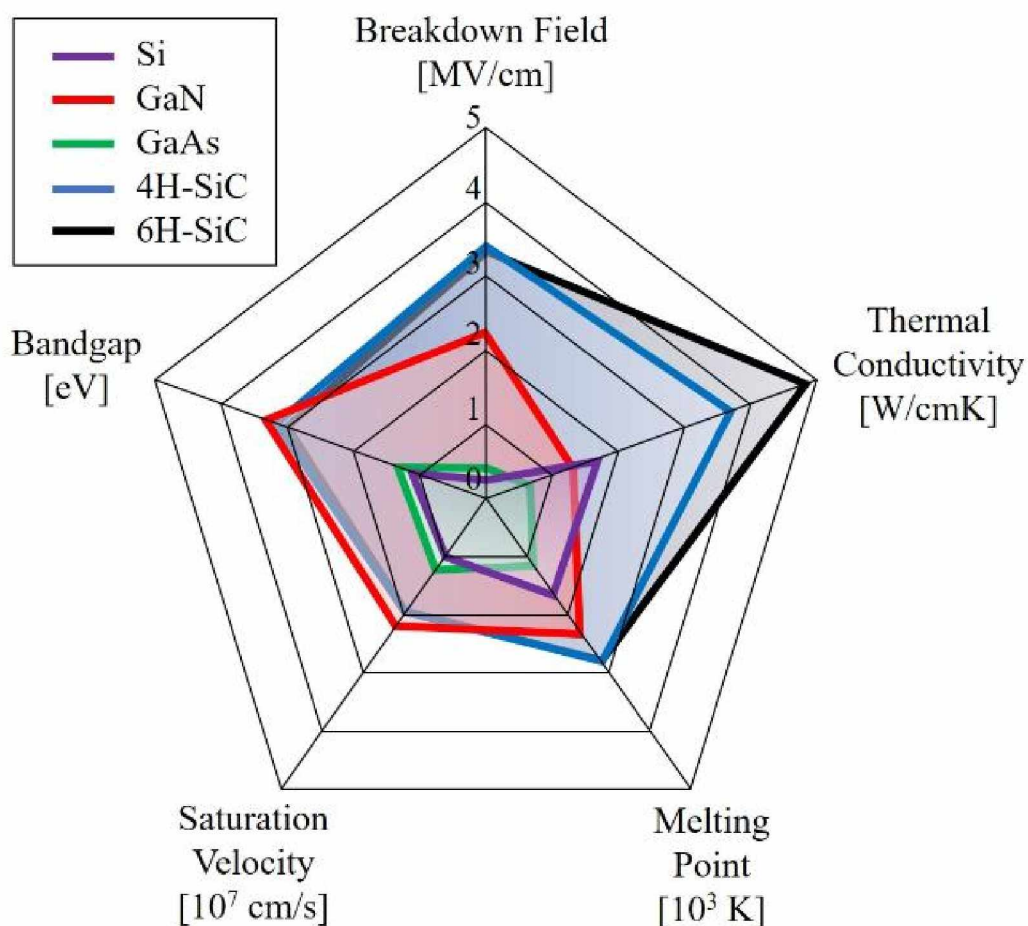


Рисунок 1.3 – Основні фізичні властивості деяких напівпровідників: «Bandgap» – ширина забороненої зони, «Breakdown field» – зона електричного пробую, «Saturation velocity» – гранична швидкість носіїв заряду у матеріалі, «Thermal conductivity» – теплопровідність, «Melting Point» – температура плавлення [4]

Інвертори, які є невід'ємною частиною сучасних енергетичних систем, стають провідними агрегатами, що піддаються зміні принципів у їх конструктивному виконанні, функціональності та застосованості, що викликається швидким розвитком засобів силової електроніки. Розвиток інверторних технологій все більше зосереджується на підвищенні їх ефективності, надійності та сумісності з різними мережами. Однією з найбільш значущих тенденцій розвитку інверторів є інтеграція інтелектуальних систем керування, які дозволяють інверторам динамічно

реагувати на зміни навантаження та умови генерації. Ці «розумні» інвертори мають складні алгоритми та можуть бути підключені до інтернет-мережі, та здатні оптимізувати процеси перетворення електроенергії в режимі реального часу, тим самим підвищуючи загальну ефективність тих енергетичних систем, де функціонують дані інвертори.

Іншою важливою сферою є можливість підвищення щільності потужності та управління температурою в інверторах. Зі збільшенням масштабів систем відновлюваної енергетики зростає попит на компактні інвертори високої потужності, що вимагає впровадження інновацій у напівпровідникових матеріалах і техніках охолодження. Напівпровідники з карбіду кремнію і нітриду галію дозволяють інверторам працювати на вищих частотах і при вищих температурах, що значно зменшує їх розмір і пом'якшує вимоги до охолодження [1].

Крім того, інтеграція систем накопичення енергії з інверторами стає вирішальним фактором у стабілізації переривчастого характеру роботи відновлюваних джерел енергії. Удосконалені інвертори розроблені для безпроблемного керування потоками енергії між джерелами, накопичувачами та мережею, забезпечуючи постійне та надійне електропостачання. Ця інтеграція має ключове значення для зменшення проблем, пов'язаних із мінливістю виробництва відновлюваної енергії, і для підвищення стійкості енергетичних систем до коливань і відключень. Майбутнє інверторних технологій в енергетичних системах формується сукупністю факторів, у тому числі прогресом у напівпровідникових матеріалах, інтеграцією інтелектуальних систем керування, наголосом на сумісності накопичувачів енергії, міркуваннями кібербезпеки та іншими чинниками.

1.2 Огляд проблем, з якими стикаються сучасні інверторні технології

Ефективність роботи інверторів є критично важливим показником, що визначається електричними характеристиками напівпровідникових матеріалів, які використовуються в їх конструкції. Дана ефективність визначає кількість енергії, втраченої під час процесу перетворення, яка часто відводиться у вигляді тепла. Зазначені втрати виникають через різні фактори: втрати провідності, коли струм протікає через напівпровідниковий матеріал, і втрати при перемиканні під час переходу між увімкненим і вимкненим станами силових елементів інвертора. Матеріали, які зараз використовуються в інверторних технологіях, такі як кремній, мають певні обмеження щодо електричних та теплових властивостей, встановлюючи максимально-досяжну ефективність [5].

Інтеграція інверторів в енергетичні системи формує унікальний набір проблем – інвертори повинні мати здатність працювати з різними вхідними напругами та струмами. Мінливість цих параметрів вимагає застосування складних стратегій керування інверторами для забезпечення стабільної та ефективної роботи мережі, що призводить до ускладнення їх конструкції та опосередковано впливає на надійність.

Іншим важливим викликом є необхідність керування температурою роботи інверторів. Тепло, що утворюється через неефективність процесу перетворення, має ефективно розсіюватися, щоб запобігти перегріву та пошкодженню компонентів інвертора. Традиційні методи охолодження (повітряного та рідинного) збільшують загальні габаритні розміри та вартість інверторів, впливають на їхню надійність і термін служби. Тому, одним із завдань при конструюванні інверторів є розробка більш ефективних методів охолодження, що повинні відповідати зростанню питомої потужності мереж [6].

Інверторні технології через свою значущість в сучасних енергетичних системах стикаються зі значними проблемами ефективності в основному через різні механізми втрат, властиві до їх конструкції. Як було сказано вище, в основі цих проблем лежать втрати на провідність, втрати на перемикання та теплові втрати, кожне з яких суттєво впливає на загальні обмеження ефективності інверторних систем.

Втрати на провідність, що виникають під час проходження струму через силові електронні пристрої, є невід'ємною частиною їх роботи, на яку впливають переважно електричні властивості матеріалів, що використовуються в напівпровідникових пристроях – опір у цих матеріалах призводить до розсіювання потужності.

Втрати на комутацію виникають під час перехідних процесів роботи інвертора – ці втрати є особливо значущими, оскільки вони залежать не лише від частоти перемикань, але й від характеристик напівпровідникових матеріалів і конструкції інверторної схеми. Чим вища частота перемикання, тим вищим є відповідні втрати, і що створює суттєву проблему при проектуванні інверторів для систем, які потребують роботи на високих частотах.

Теплові втрати є неминучим «побічним» продуктом процесів провідності та комутації, і є суттєвою проблемою в інверторних технологіях. Оскільки потужність розсіюється у вигляді тепла, це підвищує температуру компонентів інвертора, тим самим впливаючи на їх продуктивність, ефективність та надійність. Управління виробництвом, розподілом та відведенням цієї теплової енергії може мати вирішальне значення при конструюванні інвертора та застосуванні ефективних систем охолодження. Проблема ще більше загострюється при інтеграції інверторних систем у потужні енергетичні структури, коли параметри геометрії та ваги стають більш вираженими [6].

Комплексна взаємодія цих факторів, що обмежують ефективність роботи інверторів і суттєво впливають на загальну продуктивність і

функціональність інверторів в енергетичних системах. Втрати на провідність і комутацію безпосередньо впливають на ефективність перетворення енергії. У той же час теплові втрати, якщо їх не контролювати належним чином, можуть призвести до передчасного старіння компонентів, зменшуючи термін служби та надійність інверторів. Отже, загальна проблема полягає в тому, щоб збалансувати зазначені обмеження ефективності з вимогами до високопродуктивних, надійних і економічно-ефективних інверторних систем, здатних легко інтегруватися в різноманітні енергетичні інфраструктури. Таким чином, вирішення цих проблем ефективності за допомогою відповідного дизайну інверторів, ретельного вибору матеріалів і удосконалених методів охолодження має важливе значення для подальшого розвитку та ширшого впровадження інверторних технологій у стійких енергетичних системах [6].

Інверторні технології, крім усього іншого, стикаються зі значними проблемами масштабованості та ефективної інтеграції до існуючих енергетичних систем. Масштабованість інверторних технологій – це не просто питання збільшення їх потужності, воно визначає здатність підтримувати ефективність, надійність і економічність у широкому спектрі застосувань і потужностей. Оскільки вихідна потужність інверторів збільшується для задоволення промислових потреб, такі питання, як керування температурним полем, навантаження на компоненти інверторів та сумісність з електричною мережею, стають дедалі складнішими. Інтеграція інверторів високої потужності до існуючих електричних мереж створює додаткові технічні проблеми. Існуючі електромережі часто розробляються для постійних, завчасно передбачуваних навантажень і централізованої генерації. Тепер вони повинні адаптуватися до змінних потужностей, характерних для приєднання відновлюваних джерел енергії, що характеризуються переривчастістю та коливанням виробки електричної енергії. Зазначена мінливість вимагає застосування передових технологій одночасного керування електромережі та інверторів, здатних забезпечити

їх ефективну взаємодію. Це можна реалізувати шляхом включення інверторів у розумні мережі, оснащені засобами моніторингу в реальному часі та завдяки наявності можливостей адаптивного реагування. Інвертори в таких середовищах повинні не тільки перетворювати електроенергію, але й активно брати участь в управлінні мережею, що вимагає складних алгоритмів керування та відповідних протоколів зв'язку. Глобальний ланцюжок постачання компонентів інверторів (напівпровідників, конденсаторів, фідерів, радіаторів та інших) має бути надійним і гнучким, щоб відповідати різним вимогам у конструюванні. Ця потреба в гнучкості поширюється на можливість адаптації інверторів до різних технологій виробки енергії [7].

Таким чином, проблеми масштабованості та інтеграції, з якими стикаються інверторні технології в енергетичних системах, є багатогранними, та охоплює різноманітні технічні питання. Вирішення цих питань має важливе значення для успішного впровадження інверторів, як ключових елементів при переході до стійких енергетичних рішень.

1.3 Огляд літературних джерел з питання, що досліджується

У дослідженні [8] здійснено порівняльний аналіз різних напівпровідників на основі нітриду галію (GaN), карбіду кремнію (SiC) і алмазу при застосуванні засобів силової електроніки. Були оглянуті обмеження використання кремнію у потужних і високочастотних елементах і обговорюються переваги напівпровідників WBG перед елементами з кремнію: вища напруга пробою, краща теплопровідність і більшу ефективність при високочастотних сигналах. Силкові елементи на основі GaN відомі своєю високою продуктивністю на високих частотах та можливістю застосування в оптоелектроніці. Елементи на основі SiC

ідеально підходить для комутаційних пристроїв завдяки своїй високій теплопровідності та широкій перехідній зоні. Елементи з використанням алмазів, незважаючи на те, що вони знаходяться на ранніх стадіях дослідження, демонструють значний потенціал завдяки своїй винятковій ширині перехідної зони та тепловим властивостям. У статті наводиться детальне порівняння різних матеріалів на основі їх параметрів: ширина перехідної (забороненої) зони, струм пробою, рухливість електронів, теплопровідність та підкреслюються окремі характеристики цих напівпровідникових елементів для можливості їх конкретного застосування у промислових пристроях. Було також представлено аналіз ринку і прогноз значного зростання кількості напівпровідників WBG на ринку силової електроніки. Підкреслюються переваги напівпровідників WBG для їх застосування у різних областях у залежності від потужності, нечутливості до випромінювання, можливості роботи при високих температурах і визначається необхідність їх подальшого дослідження.

У дослідженні [9] оглянуто еволюцію технології кремнієвих пристроїв живлення, особливо пристроїв з широкою забороненою зоною. Також були розглянуто інші матеріали WBG з вуглецю – алмази і нанотрубки, та обговорюється потенційний вплив розвитку технології матеріалів на удосконалення силових електронних пристроїв. Було обговорено тенденції розвитку силових напівпровідникових пристроїв при застосуванні сучасних технологій – досліджуються фундаментальні закони і підкреслюється актуальність використання кремнію в засобах силової електроніки, незважаючи на наявність альтернативних матеріалів (вуглець, водень, гелій, літій, берилій і бор). Описуються покращені якості матеріалів для кремнієвих пристроїв, таких як MOSFET, IGBT і тиристори. Розглянута тенденція в адаптації до певних топологій перетворювання шляхом зменшення товщини елемента, керування типом і геометрією матеріалу та вдосконалення нанотехнологій. Визначається необхідність застосування повністю керованих двонаправлених перемикачів, що

визначає характеристику відповідних пристроїв. Передбачається можливість розширення функціональних можливостей модулів силових пристроїв у електроприводах з використанням сенсорних технологій. Обговорюється використання органічних матеріалів для майбутньої силової електроніки з огляду на їх потенціал і наявність властивостей до самовідновлення. Підкреслюється, що удосконалення кремнієвих пристроїв у майбутньому все одно викличе необхідність використання більш надійних матеріалів, що пояснюється економічними чинниками.

У дослідженні [10] увага зосереджена на вивченні гармонійних випромінювань і перехідних ефектів у потужних інверторах, що використовуються на сонячних електростанціях. Зазначені інвертори, підключені до мережі, в основному працюють з частотою перемикавання нижче 9 кГц через конструктивні обмеження. Дослідження вивчає короткострокові інциденти (аварійні стани), пов'язані з цими інверторами, та вплив цих явищ на роботу мережі. У статті визначається важливість сонячної енергії та роль потужних інверторів при передачі виробленої електроенергії в мережу. Підкреслюється необхідність застосування інверторів, здатних впоратися з короткочасними сплесками напруги та зменшення ступеня гармонійних випромінювань у мережу. Високочастотні гармоніки (зокрема супергармоніки вище 2 кГц) були визначені як критичні у впливі на якість електроенергії. У статті було здійснено польові дослідження електростанції потужністю 3 МВт, які виявили значні короткочасні випромінювання постійного струму та генерацію гармонік в діапазоні 0–9 кГц протягом певних періодів. Було розглянуто вплив цих гармонік на якість електроенергії та термін служби електричних компонентів, зокрема електролітичних конденсаторів у пристроях споживання. Для дослідження були складені імітаційні моделі інверторів, що дозволило визначити їх реакцію на різні негативні явища у мережі. Моделі були створені за допомогою Matlab/Simulink та здійснена їх оцінка при визначенні стійкості до зміни параметрів мережі та виникненні

різноманітних збурень. Дослідження підкреслили необхідність забезпечення надійної та швидкої роботи контролера при спільному функціонуванні з мережевими інверторами, що визначається реакцією на збурення – прояв динамічних навантажень та сприйняття перехідних процесів, спричинених комутаційними перемиканнями. Польові вимірювання дозволили здійснити реальну оцінку якості електроенергії. Дослідження оглядало такі проблеми, як значні стрибки постійного струму та випромінювання гармонік під час короткочасних перехідних процесів, які потенційно можуть впливати на продуктивність і термін служби мережевої інфраструктури. У статті була здійснена оцінка рівнів гармонійних коливань під час короткочасних стрибків струмів та їх порівняння з номінальними значеннями. Це порівняння має вирішальне значення для розуміння поведінки інверторів під час різних умов роботи (зокрема, перевантаження і недовантаження). Також були дослідження змінених форм хвиль струму під час генерації часткової потужності та їхні гармонічні рівні, що визначило значні спотворення у порівнянні з роботою на повній потужності. В документі було представлено всебічний аналіз випромінювання гармонік і перехідних процесів у підключених до мережі інверторах.

У дослідженні [11] визначено необхідність застосування в промисловості високоякісних інверторів і підкреслюється важливість зменшення гармонійних спотворень у формі сигналу вихідної напруги. Автори запропонували проект багаторівневого інвертора, що забезпечує 31 рівнів напруги на виході, що працює на силових елементах MOSFET, налаштованих на основну частоту. Такий підхід гарантує, що сумарне гармонійне спотворення не перевищує припустимі значення, що визначені стандартом та виключає необхідність використання активних та/або пасивних фільтрів. Було обговорено різноманітне конструктивне виконання інверторів – каскадними H-мостами, із загальною нейтральною точкою та змінною ємністю, з використанням інноваційних методів

керування. Запропонована конструкція інвертора, була побудована на каскадній напівмостовій топології, що дозволили підвищити якість електричної енергії за умови структурної простоти, що сприяло зменшенню габаритних розмірів та зниженню складності схеми керування. Моделювання роботи інвертора було реалізовано у Matlab/Simulink, яке підтвердило ефективність запропонованої конструкції. У статті також наводиться порівняльний аналіз запропонованої асиметричної схеми з іншими схемами та підкреслюються її переваги з точки зору зменшення кількості MOSFET і драйверів затворів, що призводить до меншого розміру схеми та підвищення її енергетичної ефективності.

У дослідженні [12] автори сфокусувалися на покращенні функціональності інверторів джерела струму за допомогою техніки керування модуляцією. Зазначена техніка подібна до тих, що використовуються в інверторах джерел напруги, і спрямована на розширення діапазону струму та потужності інверторів. Було представлено алгоритм для здійснення широтно-імпульсної модуляції просторового вектора для даного типу інвертора. Цей алгоритм розглядає робочу область як єдине ціле, що дозволяє здійснити плавні переходи по всьому робочому діапазону. Дослідження були направлені на вивчення гармонійних компонентів вихідного струму. Результати досліджень вказують на швидкі динамічні відгуки та підвищену вихідну потужність, підтверджені результатами моделювання. Було приведено аналітичний опис гармонійного спектру і містить поглиблене вивчення гармонійної складової низького порядку та фундаментальний аналіз на основі просторового векторного аналізу. Такий підхід продемонстрував, що запропонована методика може дозволити здійснювати керувати плавними переходами від лінійної області до шестикрокового режиму і навпаки. Застосування джерела безперебійного живлення на базі інвертора струму показує, що навіть за наявності збурень струму ланцюга постійного струму основну складову вихідної напруги інвертора можна підтримувати шляхом

регулювання ступеня модуляції, що призводить до швидших перехідних реакцій і більшої вихідної потужності порівняно з системами без цієї функції. Простота запропонованого методу свідчить про те, що його можна легко реалізувати на практиці, забезпечуючи підвищену продуктивність і ефективність енергетичних систем.

У дослідженні [13] оглянута передова технологія модуляції у однофазних інверторах джерел напруги при інтеграції надпровідного накопичувача магнітної енергії (SMES) у системи розподілу низької напруги. Автори представляють дослідження щодо підвищення ефективності інтегрованих у мережу блоків SMES, що має вирішальне значення для стабілізації роботи мікромереж та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Блоки SMES складаються з ряду компонентів, здатних контролювати потоки електричної енергії. У статті розглядаються різні типи елементів, що використовуються в SMES, і наголошується на використанні перетворювачів у джерелах напруги через їх здатність контролювати як активну, так і реактивну потужність. У статті розглядаються обмеження традиційних методів модуляції, які використовуються до тепер, через продукування високих значень гармонічних спотворень і втрат потужності, які впливають на ефективність перетворення енергії у інверторах. Автори пропонують використання удосконаленої техніки широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що називається ШІМ із рівномірним навантаженням із фіксацією третьої гармоніки у інверторі. Це дозволяє знизити спектр гармонічних спотворень і зменшити втрати потужності, що покращує продуктивність і ефективність роботи інверторів. Запропонований метод був експериментально перевірений і продемонстрував значне поліпшення в порівнянні зі звичайними методами комутації, що робить його перспективним до впровадження в розподільчих мережах низької напруги. Стаття містить детальний опис налаштувань системи, стратегій керування та експериментальних результатів, які демонструють ефективність

запропонованої методики модуляції. Проведені дослідження мають важливе значення для майбутньої розробки та інтеграції інтелектуальних рішень накопичення енергії, особливо в системах низької напруги.

У дослідженні [14] автори зосереджуються на аналізі різних контролерів струму мережі, застосованих у повномостовому інверторі, що використовується у системах з розподіленою генерацією. Дослідження, зокрема, визначає гармонійні взаємодії в мережі через резонанс між еквівалентним опором мережі та опором інвертора. Дослідження оцінює різні стратегії керування з урахуванням таких факторів, як втрати потужності, якість струму, що подаються в мережу, та динамічні характеристики під час виникнення збоїв у мережі. Порівняння здійснюється між трьома конструкціями регуляторів: пропорційно-інтегральний, пропорційно-резонансний та повторюваний – результати порівнянь говорять про те, що два останні типи є більш ефективними. У дослідженні також вивчається вплив методів модуляції та методів дискретизації на якість електричної енергії в мережі, зосереджуючись при цьому на біполярних пристроях. Результати моделювання продемонстрували, що методи модуляції та методи дискретизації суттєво впливають на якість електричної енергії у мережі. Проведені дослідження були спрямовані на підвищення продуктивності мереж з розподіленою генерацією, що дозволило покращити якість роботи електроенергії у системах. У статті також представлено всебічний аналіз контролерів струму мережі для інверторів у зазначених мережах, наголошуючи на провідній ролі стратегій керування та методів модуляції в управлінні гармонічними спотвореннями в мережі.

У дослідженні [15] досліджуються стратегії керування мережевими інверторами джерел напруги при наявності розподіленої генерації у електромережі. Автори пропонують поєднання двох контурів керування: внутрішнього контуру на основі надійного прогнозованого керування струмом (RPCC) та зовнішнього пропорційно-резонансного з

гармонічними компенсаторами (PRHC). Створена конструкція має на меті досягти високого рівня придушення зовнішніх збурень і підвищити значення коефіцієнта гармонійних спотворень струму мережі в усталеному стані. Розроблена методика дозволяє приєднувати або від'єднувати контури PRHC під час роботи, демонструючи плавну перехідну реакцію після перемикання між режимами керування, щоб отримати найкращу реакцію обох стратегій за відповідної послідовності процесів. У статті були детально описані результати моделювання для підтвердження наданих пропозицій, порівняння режимів роботи в перехідних та усталених режимах, що демонструє переваги запропонованої методики. Дослідження спрямовані на визначення ключових проблем в системах розподіленого виробництва електроенергії, зосереджуючись на забезпеченні безпечного взаємозв'язку, швидкому реагуванні на зміни напруги у відповідності до існуючих норм, підтримуючи низький рівень вмісту гармонік у введеному струмі. Запропонована стратегія керування була перевірена в різних умовах, включаючи моделювання з різними типами фільтруючих пристроїв і демонструючи її ефективність у покращенні поточної якості та зниженні гармонійних спотворень при різних сценаріях живлення.

У дослідженні [16] увага зосереджена на пом'якшенні гармонік як у підключених до мережі, так і у виокремлених мікромережах за допомогою віртуальних способів. Дослідження були спрямовані на оптимізацію роботи мікромереж для забезпечення високої надійності як при роботі в автономному, так і при роботі в мережевому режимі. У статті були розглянуті проблеми гармонік струму в однофазних мікромережах, проаналізовано значення вихідного опору інверторів джерела напруги та їх вплив на генерацію гармонік. Дослідження пропонує використання петлі віртуальної провідності для послаблення гармонійного спектру на виході в мережевому режимі через спотворення напруги мережі та локальні нелінійні навантаження. Також було представлено ємнісну віртуальну

петлю загального опору для покращення розподілу гармонійного струму та послаблення гармонік напруги в загальній точці під час автономної роботи. Для перевірки запропонованих алгоритмів були здійснені експериментальні дослідження. Було продемонстровано, що віртуальні петлі значно зменшують гармонійні спотворення і покращують якість електричної енергії та розподіл гармонійного струму, зменшення загального спотворення вихідного струму без суттєвого впливу на значення коефіцієнта потужності. Автори дійшли висновку, що запропоновані віртуальні опори можуть значно покращити роботу лінійних гармонічних компенсаторів і запропонувати простішу та ефективнішу альтернативу традиційним методам прямої компенсації для пом'якшення гармонік у мікромережах. Дослідження ефективно поєднали теоретичний аналіз із практичними експериментами для вирішення поставленої мети при управлінні мікромережами.

У дослідженні [17] автори зосередились на розумінні реакції фотоелектричних інверторів загального користування на збурення типу фазового зсуву напруги в мережі, що можуть бути поширеним явищем під час подій збоїв у роботі мережі. Дослідження є досить актуальним через зростаючий ступінь інтеграції відновлюваних джерел енергії в електричні мережі. Дослідження підкреслює важливість фазового автоматичного підлаштування частоти, що підтверджується моделюванням реакції інвертора на фазові зміни. Масштабне моделювання було здійснено з використанням програмного забезпечення Matlab/Simulink і підтверджено лабораторними експериментами з симуляцією в реальному часі. Отримані дані продемонстрували, що фазові зміни значно впливають на напругу та струм, що подаються в мережу інвертором, причому більші фазові зсуви призводять до більшого зниження напруги та струму. Експериментальні результати, підтверджені даними моделювання, показують періодичні збільшення та зменшення величин напруги та струму інвертора, коли система намагається забезпечити фазову синхронізацію. Дослідження

надало цінну інформацію про поведінку фотоелектричних інверторів за різних сценаріїв несправності мережі та їх реакцію на фазовий зсув у мережі, що сприяє більш повному розумінню інтеграції джерел відновлюваної енергії до існуючих енергосистем.

У дослідженні [18] основна увага була зосереджена на дослідженні інверторів з керованою напругою, що зазвичай використовуються в системах розподіленої генерації. Пропонується до застосування схема керування з трьома ступенями свободи для визначення паралельної роботи трифазних інверторів. Дана схема забезпечує рівномірний розподіл навантаження під час перехідних процесів, зберігаючи загальну синусоїдну опорну напругу. У статті підкреслюється важливість забезпечення пропорційного розподілу загального струму навантаження між паралельними гілками як у стаціонарних, так і в динамічних режимах, що може бути проблемою для модульних систем безперебійного живлення та мікромереж. Автори представили нову модель пристрою для паралельної роботи інверторів на основі аналізу зовнішнього струму, результатом чого є зменшення циркуляційних струмів і вирівнювання струмів навантаження від різних інверторів. Запропонований уніфікований регулятор напруги другого порядку на основі μ -аналізу кількісно оцінює вплив невизначеностей на стабільність системи та призначений для роботи на нижчих частотах перемикання. У статті також розглядається конструкція надійного контролера напруги, наголошується на необхідності високої пропускну здатності для обробки гармонійних струмів високого порядку при наявності нелінійних навантажень. Результати моделювання та експериментальні дані підтверджують ефективність запропонованої схеми керування. Проведені дослідження сприяють створенню надійної схеми керування напругою для паралельних інверторів, що підвищує стабільність і ефективність систем розподіленої генерації. У дослідженні також розглядаються такі критичні аспекти, як параметричні невизначеності, компенсація затримки та динаміка циркулюючих струмів,

пропонуються комплексні рішення для ефективного розподілу струму в паралельних інверторних системах.

У дослідженні [19] було здійснено дослідження передових технік керування придушенням резонансу для мережевих інтерактивних інверторів, обладнаних індуктивно-ємнісними фільтрами. Основна увага була зосереджена на вирішенні проблем, з якими стикаються мережеві інтерактивні інвертори, що працюють в умовах низьковольтної мережі, і характеризуються високими значеннями «паразитних» опорів та низьким значенням коефіцієнту короткого замикання. Зазначені умови часто призводять до збудження резонансу індуктивно-ємнісних фільтрів, що може викликати порушення роботи інвертора. Щоб протистояти цьому, дослідження запроваджує схему прогностного керування, спрямованого на автономну зміну цілей контролера для придушення явища резонансу. Це досягається шляхом перемикання струмів зворотної послідовності на основі стану мережі. Примітним аспектом запропонованої схеми є її надійна робота у різних умовах функціонування мережі, наявності невідповідності параметрів, збурень у мережі та здатність плавно переходити у різні режими роботи. Дослідження також включає комплексне вивчення різних методів придушення резонансу, оцінку їх переваг і недоліків. Було детально описано системне моделювання та формулювання запропонованої адаптивної моделі прогностного керування, включаючи модель застосування дискретного часу та параметри адаптивної функції вартості. Дія самостабілізації та оцінка ефективності системи демонструються різними тематичними дослідженнями. Окрім технічних аспектів, у документі також розглядається надійна робота контролера за невідповідності параметрів моделі та збоїв у мережі. Проведене комплексне дослідження пропонує краще уявлення про підвищення стабільності та ефективності роботи мережевих інтерактивних інверторів в умовах низьковольтних мереж.

2 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ПОЛІПШЕННЯ РОБОТИ ІНВЕРТОРІВ НА ОСНОВІ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

2.1 Загальні відомості покращення ефективності роботи інвертора

У сфері силової електроніки пошуки способів оптимізації роботи та ефективності інверторів є однією з головних задач.

У сучасній техніці силова електроніка викликає все більшу зацікавленість, що сприяє досягненню ефективного перетворення та контролю передачі електричної енергії. Ці досягнення базуються на принципах електротехніки та матеріалознавства, охоплює проектування, аналіз і застосування твердотільних електронних пристроїв для керування та перетворення електричної енергії [20].

В основі силової електроніки лежить напівпровідникові пристрої – діоди, тиристори, транзистори та інтегральні схеми, розроблені для комутації та керування потужними електричними струмами та напругами з високим ступенем точності. Силова електроніка відіграє вирішальну роль у адаптації та управлінні електроенергією для різних застосувань: перетворення змінного струму у необхідну форму, забезпечення керування роботою машин у електроприводах, забезпечення оптимальної продуктивності та енергетичної ефективності [20].

Силова електроніка, крім іншого, стала запорукою прогресу в розвитку технологій розумних мереж, що пояснюється можливістю динамічного контролю потоків електричної енергії з одночасним підвищенням надійності та ефективності розподілу електричної енергії. Силова електроніка дозволяє конструювати різноманітні сучасні електронні конструкції.

Електроприводи є невід'ємними компонентами сучасних систем автоматизації та керування і піддаються всебічному технологічному розвитку в області електромеханічного перетворення енергії. Область їх

застосування охоплює різні сектори промисловості. У своїй основі електроприводи складаються з електродвигуна, силового електронного перетворювача та системи керування. Силовий електронний перетворювач у системі приводу відіграє вирішальну роль. Він модулює електричну потужність, що подається на двигун, забезпечуючи таким чином точний контроль над частотою обертання та крутним моментом двигуна. Ця модуляція зазвичай досягається за допомогою інверторів, випрямлячів і конвертерів. Система управління керує роботою приводів шляхом обробки вхідних сигналів і керує силовим електронним перетворювачем для досягнення необхідних параметрів. Така інтеграція дозволяє використовувати такі функції, як регулювання частоти обертання, контроль крутного моменту та оптимізацію динамічних реакцій за умови забезпечення ефективності роботи приводу [21].

2.2 Способи і принципи керування температурою

За умов складності конструкцій силовій електроніки управління температурою інверторів є одним з ключових аспектів для досягнення їх ефективності та довговічності. Інвертори при їх роботі піддаються значному тепловому навантаженню через втрати потужності під час роботи (рис. 2.1, 2.2) [22].

Природа теплових проблем в інверторах зумовлена їх експлуатаційними характеристиками – втрати потужності головним чином відбуваються під час комутаційних процесів. Якщо цими тепловими потоками не керувати належним чином, це може призвести до перегріву, що негативно впливає на ефективність, надійність роботи та термін служби інверторів [22].

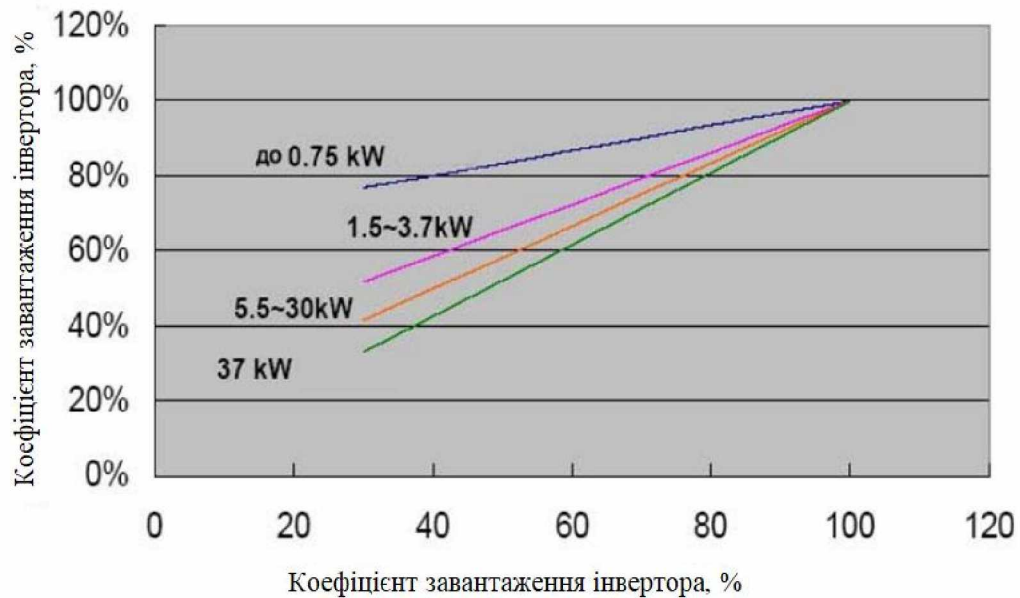


Рисунок 2.1 – Графік залежності тепловиділення інвертора від коефіцієнта його завантаження [22]

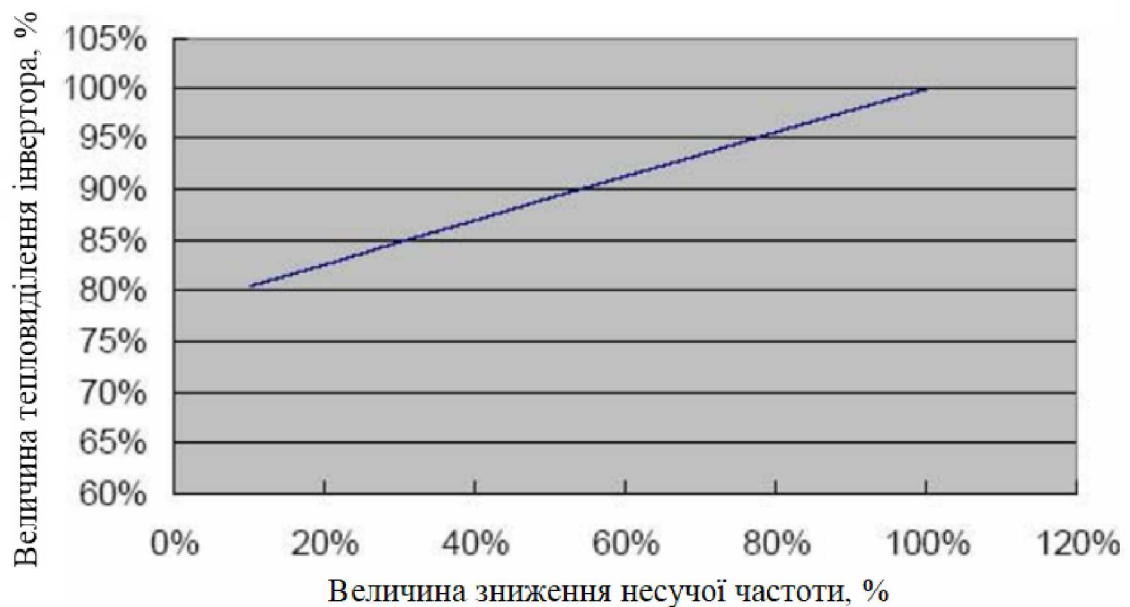


Рисунок 2.2 – Графік залежності величини тепловиділення від значення несучої частоти [22]

Сучасні рішення для управління температурою спрямовані на вирішення цих проблем за допомогою передових технологій охолодження та підбору матеріалів з високою теплопровідністю. Основний підхід при цьому міститься у використанні радіаторів з надпровідних матеріалів та

сучасних систем охолодження. Так, традиційні радіатори, які часто виготовляються з алюмінію, витісняються матеріалами з вищою теплопровідністю – мідь або графіт, які дозволяють досягти ефективного розсіювання тепла (рис. 2.3, 2.4) [22].

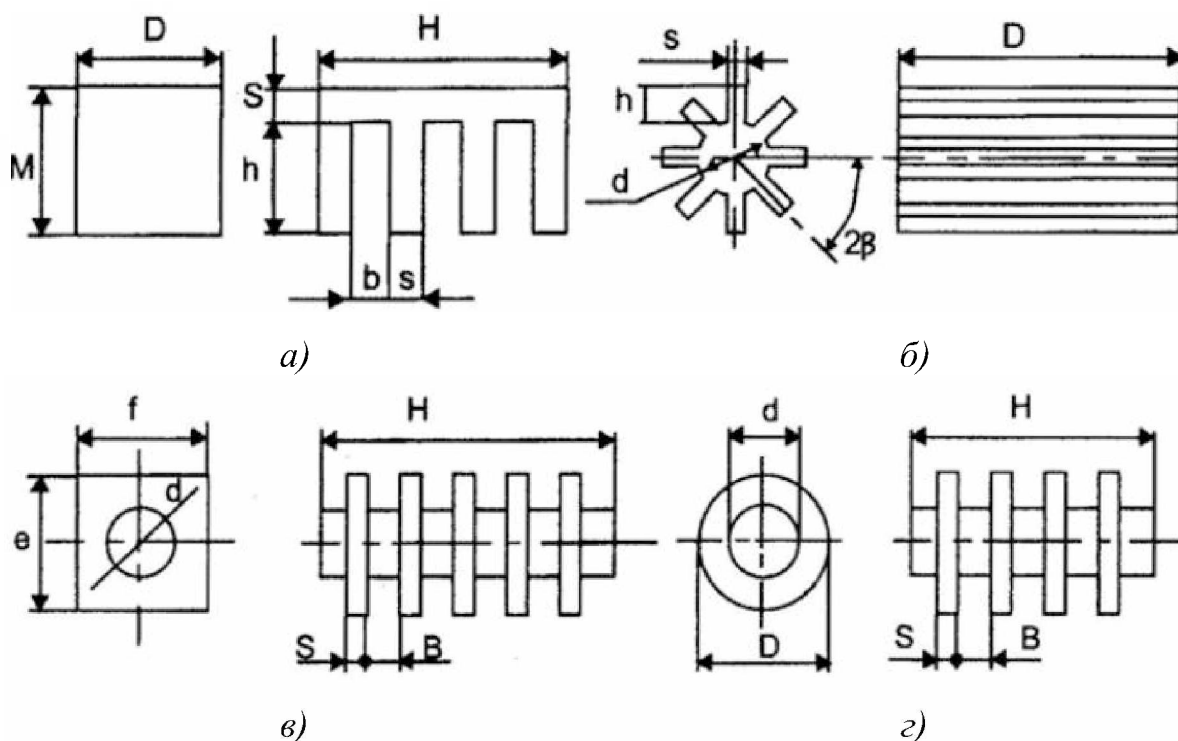


Рисунок 2.3 – Конструкції радіаторів при природному повітряному охолодженні: *а)* – з плоскими ребрами на плоскій поверхні, *б)* – з плоскими ребрами вздовж циліндричної поверхні, *в)* – з плоскими ребрами поперек циліндричної поверхні, *з)* – з круглими ребрами поперек циліндричної поверхні

Ще одним прогресивним матеріалом для досягнення встановлених температурних параметрів є спеціальні полімери. Зазначені матеріали наповнені теплопровідними наповнювачами, такими як нітрид бору або нітрид алюмінію, які поєднують високу теплопровідність із пластичністю та легкою вагою. Їх застосування в інверторах забезпечує більш універсальні варіанти конструкції, забезпечуючи ефективне розсіювання тепла в компактних і складних конструкціях [23].

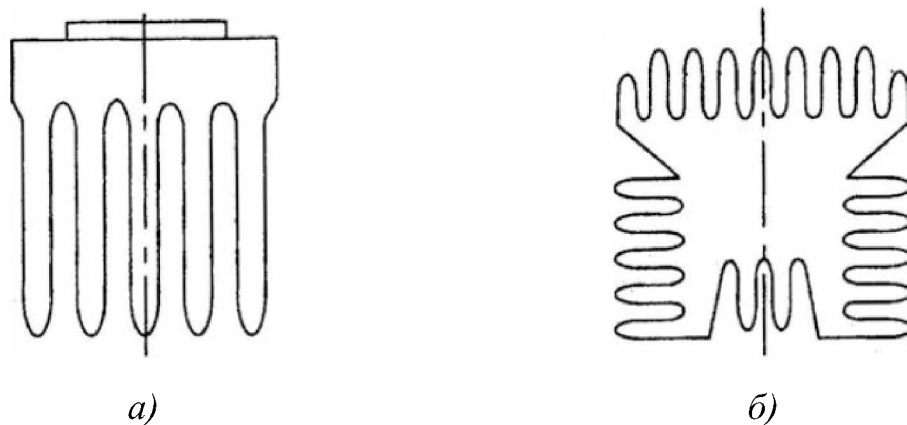
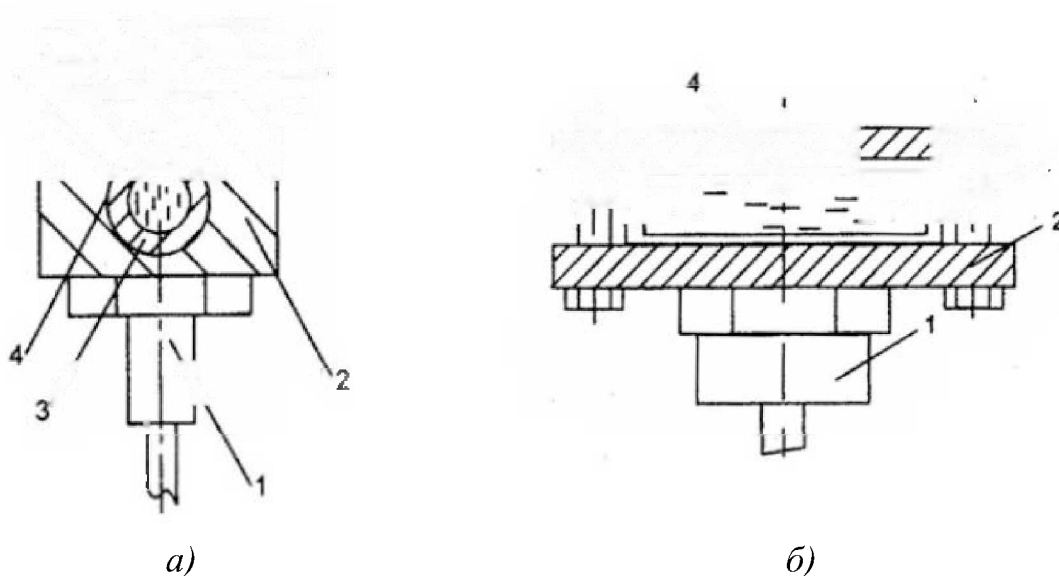


Рисунок 2.4 – Конструкція радіаторів при примусовому повітряному охолодженні: *а)* – вітчизняні, *б)* – фірми Siemens

У деяких високопродуктивних системах використовуються рідинні системи охолодження, які забезпечують циркуляцію теплоносія (суміш води та гліколю) навколо теплогенеруючих компонентів, забезпечуючи ефективну теплопередачу та підтримуючи оптимальне значення робочої температури (рис. 2.5) [24].



1 – силовий напівпровідниковий елемент, 2 – охолоджувач, 3 – металева труба, 4 – ізоляційна прокладка

Рисунок 2.5 – Конструктивні схеми водяного охолодження: *а)* – вітчизняні, *б)* – фірми General Electric [25]

Також до прогресивних методів охолодження можна віднести випарне охолодження – відведення тепла здійснюється за рахунок зміни агрегатного стану теплоносія шляхом перетворення його на пару в процесі кипіння. Інтеграція новітніх матеріалів зі зміною стану також може бути ефективним рішенням для управління температурою. Ці матеріали поглинають і виділяють теплову енергію під час фазового перетворення, як правило, з твердого стану в рідкий. У періоди високої втрати потужності надлишок тепла поглинається, підтримуючи стабільну температуру. Коли навантаження зменшується, накопичене тепло поступово розсіюється, запобігаючи тепловому перевантаженню [24].

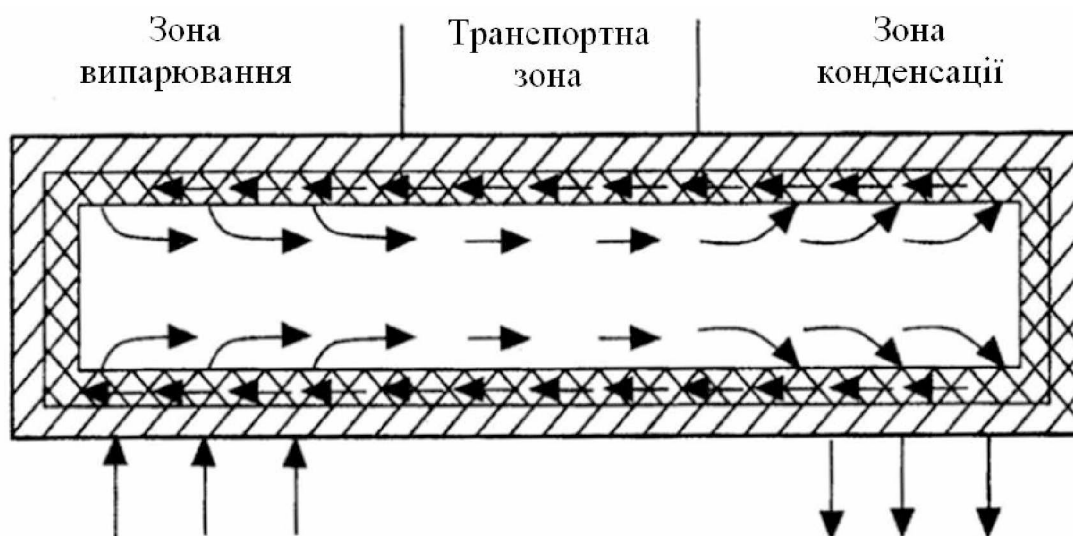


Рисунок 2.6 – Теплова труба

Реалізація принципів управління температурою залежить не тільки від пасивних методів охолодження – широко впроваджуються активні системи термоконтролю, які оснащені відповідними температурними датчиками. Ці системи активно відстежують температуру критичних компонентів і відповідним чином здійснюють регулювання роботи механізмів охолодження, забезпечуючи оптимальні температурні умови під час роботи інверторів [24].

Додатковими інструментами можуть стати імітаційні моделі та здійснення моделювання під час управління температурою. При цьому використовують програмне забезпечення, що реалізує принципи обчислювальної гідродинаміки і термічного аналізу. Таким чином можна передбачити виділення тепла та напрямки теплових потоків всередині інвертора, дозволяючи розробляти більш ефективні рішення для охолодження. Ці інструменти полегшують оптимізацію систем теплового керування для розробки фізичних прототипів [26].

Техніки управління температурою інверторів не залишаються на місці і є свідченням складності силових електроніки. Завдяки використанню передових матеріалів, інноваційних систем охолодження та стратегіям інтелектуального термоконтролю інвертори сьогодні краще справляються з температурними проблемами, пов'язаними з їх роботою.

2.3 Вплив гармонічних складових в енергосистемах від роботи інверторів

Гармоніки являють собою додаткові коливання, що спотворюють форму електричного сигналу, і можуть бути згенеровані інверторами при процесах перетворення постійного струму в змінний. Ці спотворення, якщо їх не контролювати, можуть мати шкідливий вплив на енергосистему – зниження ефективності, перегрів компонентів і порушення електромагнітної сумісності. Зокрема, необхідно зосередитись на інноваційних методах, що дозволяють знизити рівень вищих гармонік в інверторах, що може бути запорукою підвищення загальної працездатності та ефективності роботи енергосистем [27].

Генерація гармонік в інверторах в основному зумовлюється перемиканнями та їх впливом на роботу енергосистем. У процесі роботи

перемикачів в інверторі відбувається перемикання між окремими станами, що при формування сигналу змінного струму від джерела постійного струму, у системі виникає нелінійність, що проявляються у вигляді гармонік. Ці гармоніки не тільки негативно впливають на ефективність інвертора, але й становлять загрозу для стабільності всієї електромережі та роботи іншого підключеного до неї електричного обладнання (рис. 2.7).

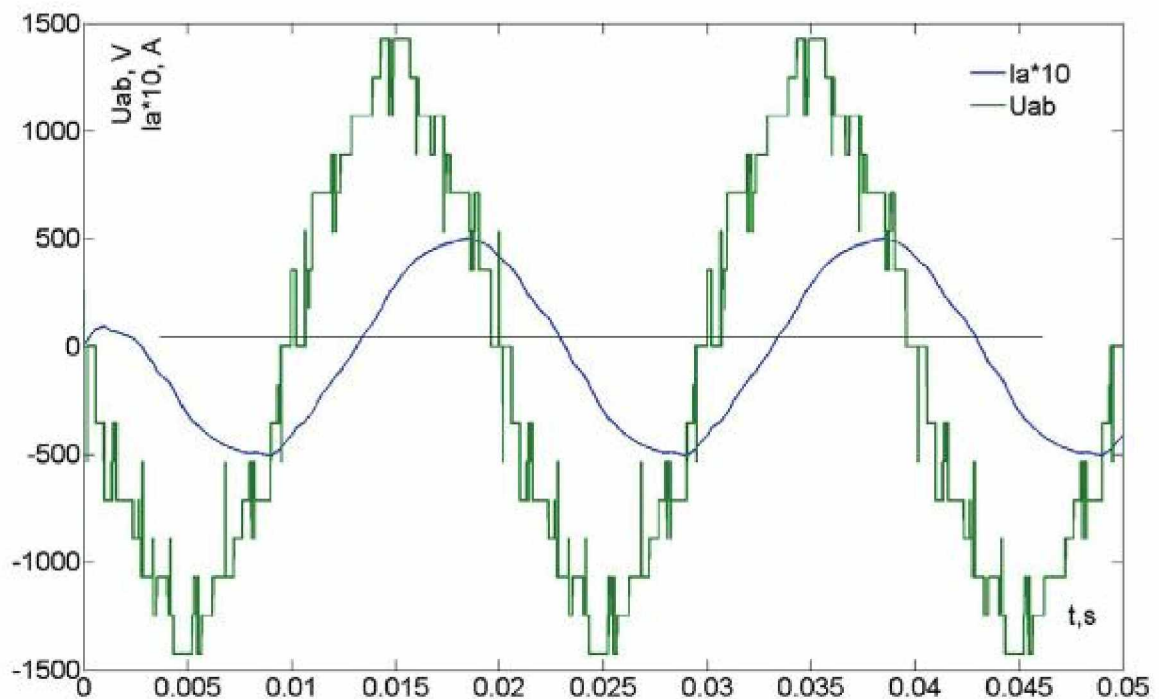


Рисунок 2.7 – Вплив наявності гармонік на форму сигналу вихідної напруги і струму

Основною стратегією у боротьбі з гармоніками є впровадження різноманітних методів їх фільтрації. У якості таких пристроїв виступають пасивні фільтри, що використовуються для ослаблення певних гармонічних частот, та активні фільтри, що можуть динамічно протидіяти гармонікам шляхом генерації компенсуючого струму, який ефективно поглинає небажані гармонічні частоти [27].

Іншим способом компенсації та недопущення виникнення гармонік є впровадження спеціальних методів модуляції в інверторі. Головним

методом при цьому виступає метод широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Принципи модуляції здійснює контроль тривалості інтервалів перемикання в інверторі, тим самим формуючи форму вихідного сигналу з більшою точністю та зменшуючи вміст гармонійних складових. Найоптимальнішим варіантом ШІМ є просторова векторна модуляція, яка дозволяє оптимізувати послідовності перемикання, що призведе до ще більшого зниження гармонійних спотворень (рис. 2.8) [28].

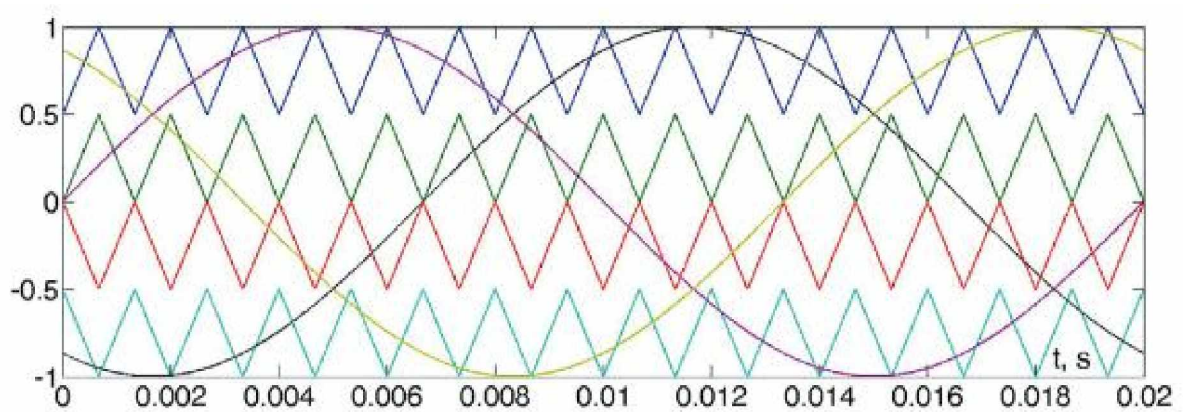


Рисунок 2.8 – Результати застосування фазової опозиції при формуванні ШІМ

Іншим інноваційним підходом у «боротьбі» з гармоніками є створення спеціальної конструкції самого інвертора. Багаторівневі інвертори здатні синтезувати форму вихідного сигналу шляхом використання кількох різних рівнів напруги, що по суті створює форму сигналу наближену до синусоїдальної, тим самим зменшуючи вплив гармонік. Така архітектура не тільки підвищує ефективність, але й сприяє мініатюризації конструкції інвертора, оскільки дозволяє використовувати комутаційні пристрої з нижчими номінальними характеристиками (рис. 2.9, 2.10) [29].

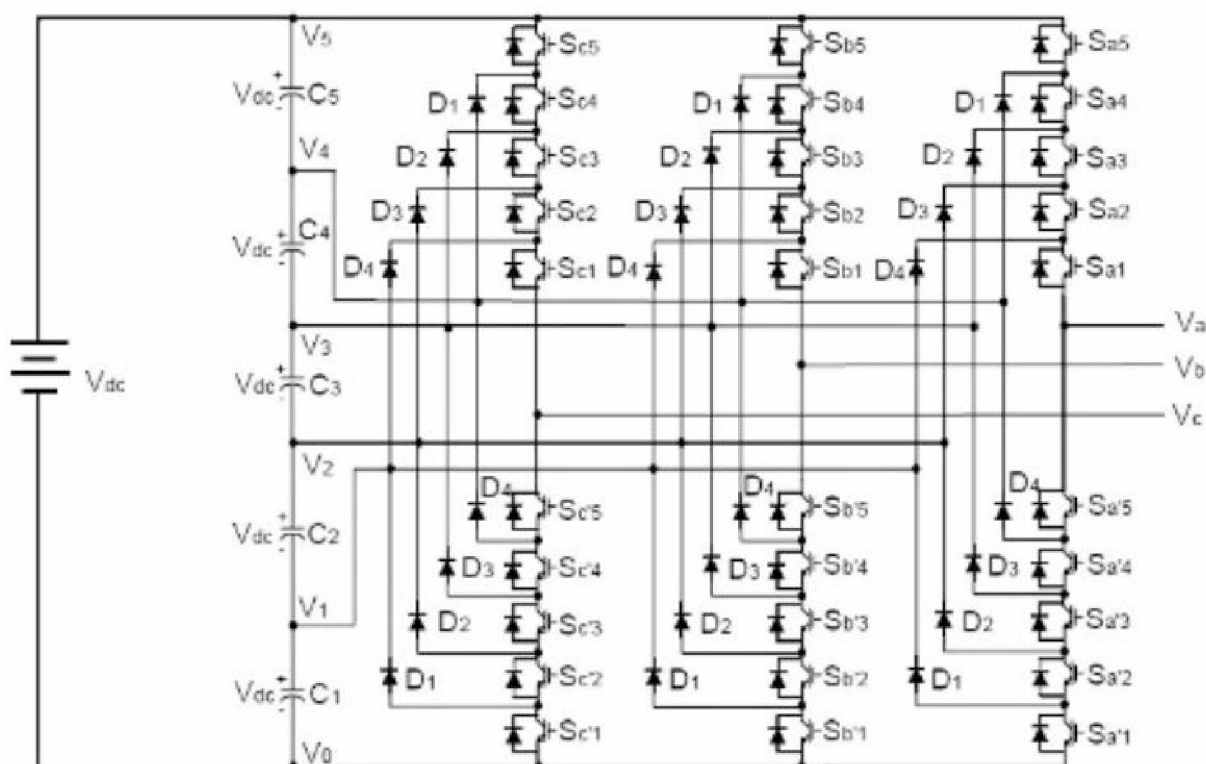


Рисунок 2.9 – Схема багаторівневого інвертора напруги з амплітудною ШІМ

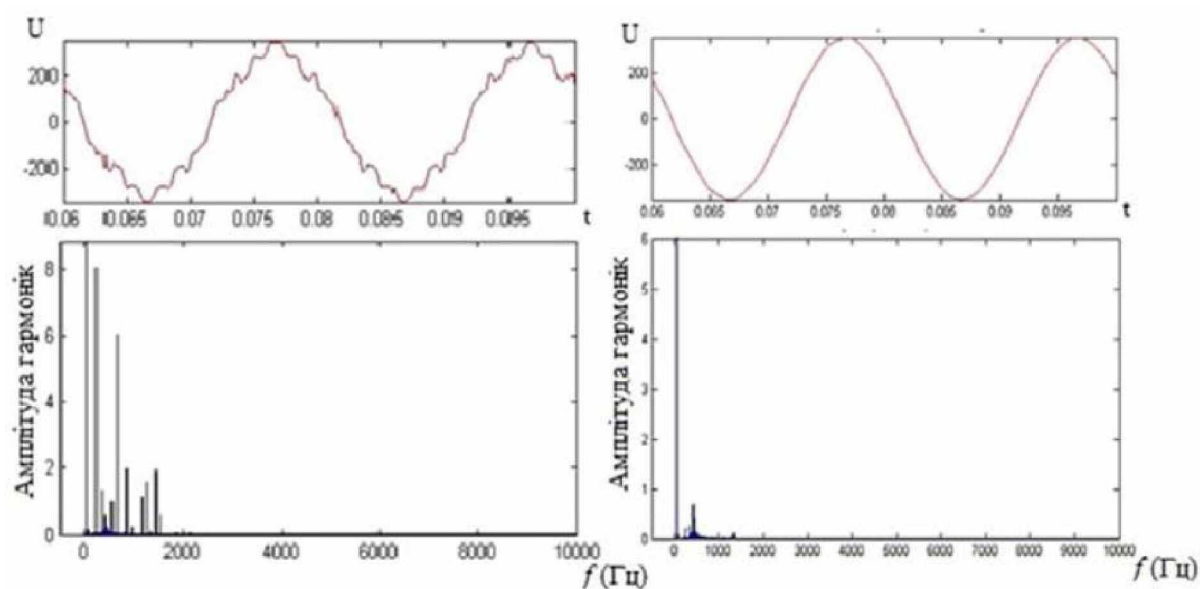


Рисунок 2.10 – Результати застосування багаторівневого інвертора напруги з амплітудною ШІМ

Інтеграція провідних цифрових систем керування в конструкцію інверторів може також зіграти позитивну роль у зменшенні величини

гармонік. Зазначені системи керування, часто побудовані на складних алгоритмах і можливостях обробки сигналів у реальному часі, та можуть здійснити точне регулювання дій з перемикання, оптимізуючи форму сигналу для мінімізації гармонік. Використання цифрових сигнальних процесорів і мікроконтролерів на основі удосконалених алгоритмів дозволяє інверторам динамічно адаптувати свою роботу до мінливих умов навантаження, додатково зменшуючи генерацію вищих гармонік (рис. 2.11) [30].

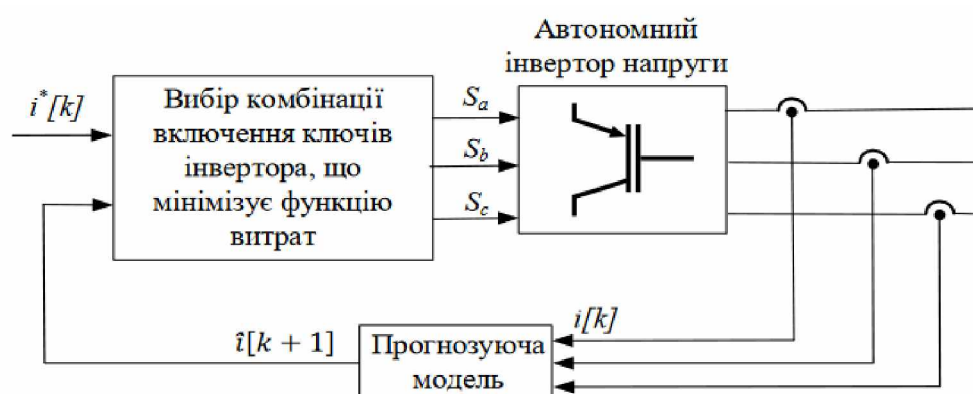


Рисунок 2.11 – Загальна структура прогнозного керування струмом трифазного інвертора напруги

Останньою тенденцією на шляху зменшення гармонійних складових є застосування новітніх технологій, таких як штучний інтелект (ШІ) і методів машинного навчання. Системи, керовані штучним інтелектом, можуть передбачати виникнення гармонійних спотворень, аналізувати шаблони поведінки та шляхом внесення коригування в режимі реального часу в роботи інвертора компенсувати потенційні гармонійні коливання в електричній мережі.

Зменшення рівня гармонік при роботі інверторів є комплексною проблемою, яка потребує впровадження провідних методів фільтрації, складних методів модуляції, новітніх конструкцій та найсучасніших систем керування. Зазначене дозволить не тільки підвищити ефективність і

термін служби інверторів, але й значно стабілізувати роботу системи живлення споживачів (рис. 2.12).

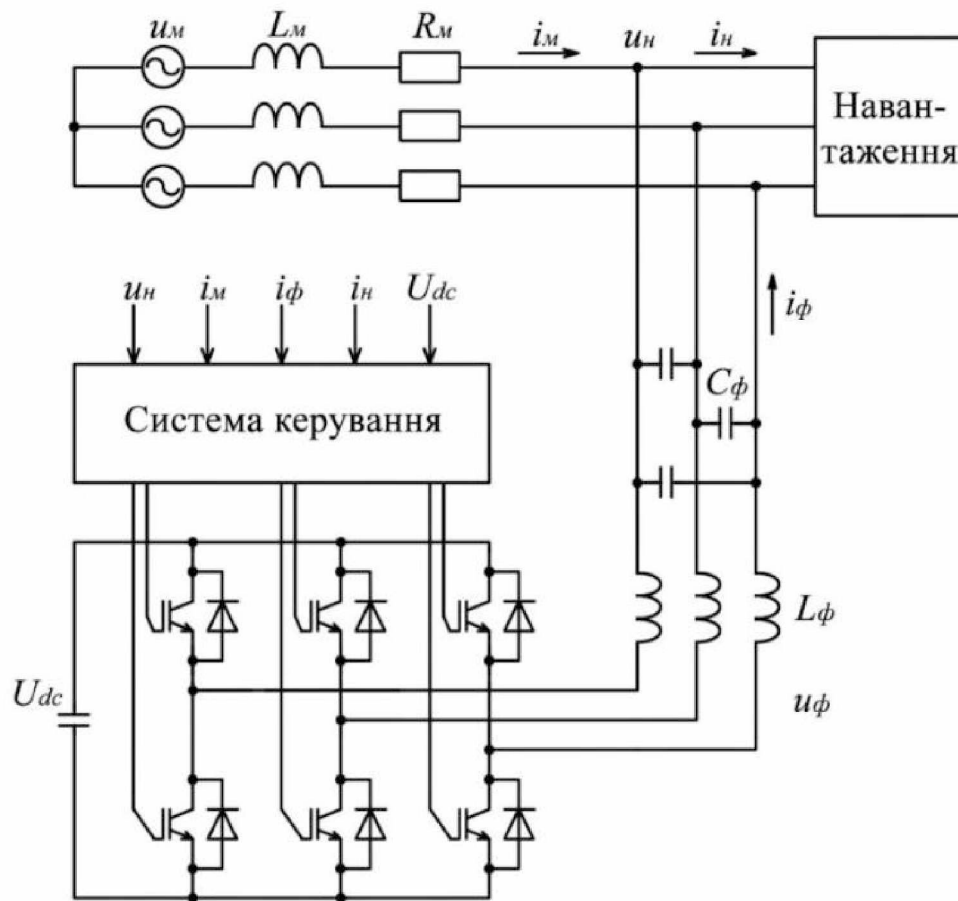


Рисунок 2.12 – Підключення паралельного активного фільтра до трифазної мережі живлення

2.4 Огляд питань забезпечення сумісності та стабільності

Інтеграція інверторів, побудованих з використанням силових елементів, у електричну мережу вимагає забезпечення сумісності та стабільності роботи мережі для злагодженої роботи елементів енергосистем.

Головною проблемою забезпечення сумісності інверторів з мережею є їхня здатність синхронізуватися з формою хвилі напруги мережі з огляду на значення частоти, амплітуди та зсуву фази. Зазначена синхронізація має вирішальне значення для того, щоб мати змогу отримати гарантії з того, що потужність, яка проходить через інвертор, узгоджується з існуючим потоком електричної енергії в мережі. Для досягнення визначеної синхронізації рекомендується використання різноманітних стратегій керування, зокрема – керування фазовим автопідстроюванням частоти. Цей спосіб дозволяє інвертору безперервно регулювати потужність на виході, щоб узгодити його з формою сигналу напруги в мережі, забезпечуючи безперебійну інтеграцію живлення від інвертора в мережу [31].

Іншим важливим аспектом забезпечення сумісності з мережею є здатність інвертора справлятися з перешкодами та аварійними станами у мережі. Сучасні інвертори оснащені можливістю витримувати несправності, що дозволяє їм підтримувати роботу протягом коротких періодів нестабільності, перевантажень, провалів або стрибків напруги в мережі. Ці функції мають важливе значення для запобігання відключенню інвертора від мережі під час перехідних процесів, що може спричинити дестабілізацію енергосистеми.

Інвертори все частіше розробляються для надання забезпечення додаткових можливостей роботи мереж, які є важливими для підтримки їх стабільної та надійної роботи. Серед таких можна відзначити можливість регулювання напруги, реактивної потужності та частоти. Шляхом динамічного регулювання вихідної потужності інвертори можуть допомогти стабілізувати напругу та частоту мережі, особливо у випадках, коли мережа піддається швидким змінам споживання або виробки енергії.

Впровадження «розумних» інверторів дозволяє значно поліпшити сумісність у мережі. Такі інвертори забезпечують складними алгоритмами та засобами взаємодії, що дає їм змогу відповідно реагувати на умови

роботи мережі з урахуванням керуючих команд від оператора. Застосування таких інверторів дозволяє відповідним чином реагувати на попит тим самим допомагаючи в балансуванні навантаження та знижуючи ризик перевантаження мережі. Одночасно це дозволяє забезпечити відповідність нормативним стандартам і правилам забезпечення сумісності в мережі. Дотримання стандартів гарантує, що інвертори будуть не тільки сумісні з експлуатаційними вимогами мережі, але й сприятимуть досягненню принципів стабільності та безпеки [31].

Отже, забезпечення сумісності з мережею та стабільності роботи інверторів є багатоцільовим завданням, що включає вдосконалені методи керування, забезпечення можливості виявлення несправностей, надання додаткових можливостей у роботі мереж та відповідність нормативам і стандартам.

2.5 Впровадження розширених принципів контролю

У сфері силової електроніки ефективність інверторів значною мірою залежить від стратегій керування, які використовуються в їх роботі. Удосконалені стратегії керування допомагають оптимізувати продуктивність інверторів, забезпечуючи їх ефективність, надійність та адаптивність у різних сферах їх застосування. В основі цих передових стратегій лежить впровадження цифрових методів керування (рис. 2.13, 2.14) [32].

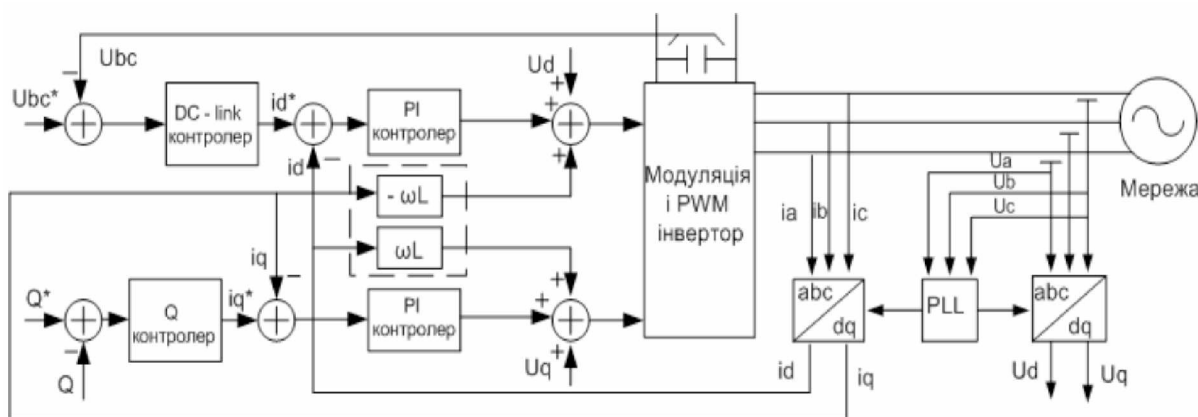


Рисунок 2.13 – Структурна схема керування інвертором за допомогою PI-контролера [32]

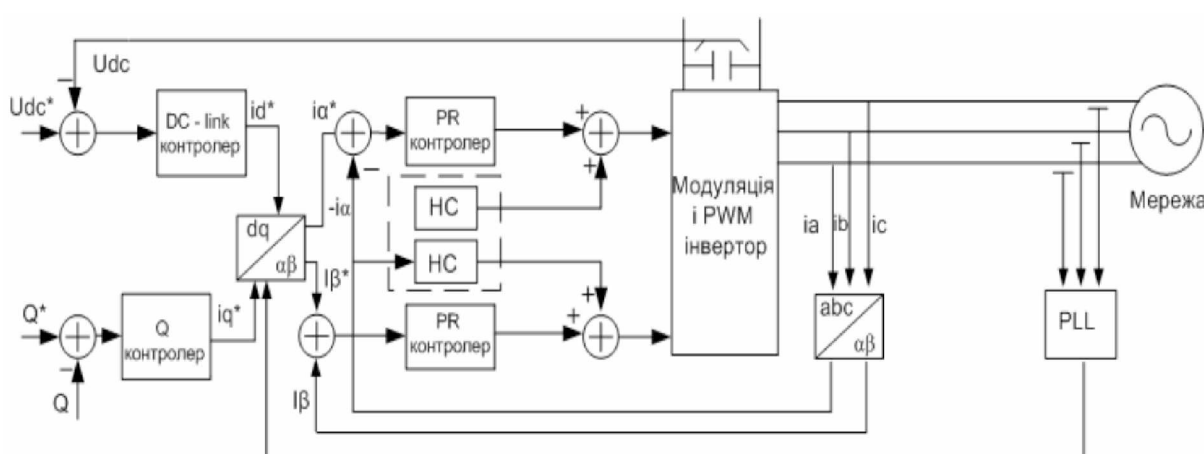


Рисунок 2.14 – Структурна схема керування інвертором за допомогою PR-контролера [32]

Принципи цифрового керування передбачають використання мікропроцесорів і цифрових процесорів, що дозволить забезпечити високу точність і гнучкість у порівнянні з традиційними аналоговими методами керування. У інверторах цифрові системи керування відповідають за виконання складних алгоритмів, що керують роботою інвертора, зокрема – модуляцію вихідних сигналів, керування потоками потужності та реакцію на умови роботи мережі. Можливість оновлювати та вдосконалювати ці алгоритми за допомогою відповідного програмного забезпечення дозволяє постійно оптимізувати функціональність інвертора [33].

Впровадження принципів машинного навчання та штучного інтелекту у системах керування інвертором дозволяє забезпечити визначені стратегії управління, адаптувати свою роботу на основі даних у реальному часі та у відповідності до прогностичної аналітики. Використовуючи алгоритми машинного навчання, інвертори можуть передбачати майбутню поведінку електричних систем та відповідно коригувати свою роботу, забезпечуючи максимальний рівень ефективності та стабільності. Типовим прикладом цифрового керування в інверторах є реалізація складних методів модуляції. Точність здійснення модуляції безпосередньо впливає на якість змінного струму на виході, впливаючи на ефективність роботи інвертора та зменшуючи генерацію гармонік в енергосистемі [34].

Здійснення моніторингу та керування в реальному часі є невід'ємною частиною вдосконалених принципів керування інвертором. Сучасні інвертори необхідно оснащувати набором датчиків та комунікаційними технологіями, що дозволяє постійно контролювати «внутрішнє» та «зовнішнє» електричне середовище. Ці дані, отримані у реальному часі, дозволяють приймати рішення та дій з керування негайного. Інтеграція інтернет-технологій ще більше розширює зазначену можливість та дозволяє інверторам «спілкуватися» з іншими пристроями та системами, сприяючи їх скоординованій роботі в рамках енергетичної системи, що розглядається.

Зазначені принципи керування інверторів дозволяють зосередити увагу на підвищенні надійності та подовженні терміну служби цих інверторів. Складання алгоритмів прогностичного технічного обслуговування, що формуються на основі даних поточного моніторингу та аналізу статистичних даних, можуть завчасно виявляти потенційні проблеми та збої. Отже, завдяки використанню цифрового керування, удосконалених методів модуляції, штучного інтелекту та машинного навчання, моніторингу в реальному часі та прогностичного обслуговування можна значно підвищити і розширити можливості інверторів.

2.6 Використання принципів адаптації та модульності конструкцій інверторів

Використання принципів адаптації та модульності конструкції інверторів дозволяє цим пристроям підлаштовуватися до різноманітних вимог роботи мережі по потужності та зміни конфігурацій системи – це робить їх універсальними та ефективно працюючими.

Принцип адаптації інверторів означає здатність регулювати значення потужності у відповідності до вимог до потужності, яку необхідно передати. Ця адаптивність має першочергове значення у випадках, коли попит на електричну енергію є динамічним процесом. Цю мету можна досягти шляхом відповідного проектування інверторів, що дозволяє їм ефективно працювати на різних рівнях потужності. Цього також можна досягти також шляхом паралельного з'єднання кількох однотипних інверторів, тим самим збільшуючи загальну потужність системи. Принципи забезпечення адаптації передбачають те, що продуктивність інвертора залишалася оптимальною в межах робочого діапазону. Це вимагає ретельного розгляду таких аспектів, як керування температурою і досягнення максимального ККД при різних рівнях навантаження та здатність підтримувати стабільну роботу за різних умов навантаження. При цьому стратегії керування можуть відігравати досить важливу роль, дозволяючи інвертору динамічно регулювати свої параметри на основі поточного навантаження та умов експлуатації [35].

Модульність конструкції інверторів визначає такий підходу до проектування, коли інвертор складається з кількох взаємозамінних блоків або модулів. Це дозволяє отримати значні переваги з точки зору гнучкості, обслуговування та можливостей оновлення та відновлення їх роботи. Модульні конструкції інверторів можна легко налаштувати у відповідності до конкретних вимог по потужності шляхом приєднання або від'єднання

модулів. Крім того, у разі виникнення несправності окремі модулі можна легко замінити або обслужити, не порушуючи роботу всієї системи, що підвищує загальну надійність і скорочує час простою. Переваги модульних конструкцій інверторів також впливають на простоту встановлення та забезпечення логістики у енергетичній системі. Кожен окремий модуль зазвичай є меншим за габаритами та легший з боку керування, у порівнянні з габаритними (більшими за розмірами), простіший до транспортування та встановлення [35].

Більш адаптовані та модульні за конструкцією інвертори забезпечують ефективну та гнучку роботу, пристосовуючись до переривчастої природи роботи різних джерел енергії, забезпечують індивідуальні рішення та швидке прилаштування.

Отже, пропонуючи гнучкі та надійні рішення, принципи адаптації та модульності конструкцій інверторів можуть задовольнити різноманітні та динамічні потреби сучасних енергосистем і постійний прогрес у цій галузі має вирішальне значення для забезпечення того, щоб інверторна технологія залишалася однією з передових.

3 РОЗРАХУНОК ТРИФАЗНОГО ІНВЕРТОРА

3.1 Вихідні дані до розрахунку

Для здійснення розрахунку трифазного транзисторного інвертора задамось вихідними даними, що визначають необхідність забезпечення вихідних параметрів на споживачі у залежності від вхідних параметрів.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Позначення, од.вим.	Значення
Напруга живлення інвертора	U_i , В	48
Повна потужність на навантаженні	S_{2n} , ВА	$2 \cdot 10^3$
Лінійна напруга на навантаженні	$U_{2л}$, В	220
Частота у лінії навантаження	f_2 , Гц	50
Коефіцієнт потужності навантаження	$\cos \varphi$	0,85

3.2 Розрахунок і вибір силових елементів інвертора

Інвертор напруги являє собою перетворювач, побудований на силових елементах і який здійснює перетворення постійної напруги в змінну прямокутно-ступінчасту форму, форма якої залежить від навантаження і може за допомогою різних налаштувань і прийомів наближатися до синусоїдальної форми. Для забезпечення належного функціонування інвертора напруги використовуємо в його конструкції повністю керовані силові елементи – біполярні транзистори з ізолюваним затвором, кожен з яких шунтується діодом, включеним зустрічно-паралельно, що забезпечує двосторонню провідність при протіканні реактивних струмів, та постачені

конденсатором великої ємності на вході для стабілізації вхідної напруги та створення контуру для протікання реактивних струмів.

Значення фазної синусоїдної напруги на навантаженні [5]:

$$U_{2\phi} = \frac{U_{2л}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В.} \quad (3.1)$$

Значення фазного синусоїдного струму через навантаження [5]:

$$I_2 = \frac{S_{2л}}{3 \cdot U_{2\phi}} = \frac{2 \cdot 10^3}{3 \cdot 127} = 5,25 \text{ А.} \quad (3.2)$$

Значення фазної напруги на інверторі [5]:

$$U_{1\phi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_i = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot 48 = 21,61 \text{ В.} \quad (3.3)$$

Коефіцієнт трансформації трансформатора інвертора [5]:

$$n = \frac{U_{2\phi}}{U_{1\phi}} = \frac{127}{21,61} = 5,88. \quad (3.4)$$

Діюче значення синусоїдного первинного струму [5]:

$$I_{i1} = I_2 \cdot n = 5,25 \cdot 5,88 = 30,86 \text{ А.} \quad (3.5)$$

Значення частоти перемикання силових елементів $f_{Th} = 0,06$ Гц і значення коефіцієнта потужності інвертора $\cos\varphi_i = 0,8$.

Навантажувальний параметр [5]:

$$k_n = \frac{1}{2 \cdot f_{Th} \cdot \pi} = \frac{1}{2 \cdot 0,06 \cdot \pi} = 2,65. \quad (3.6)$$

Максимальне значення струму, що протікає через транзистори [5]:

$$I_{max} = 0,75 \cdot I_{il} \cdot \frac{1 - a^2}{\cos \varphi_i \cdot (1 - a + a^2)} \quad (3.7)$$

де

$$a = e^{\frac{-k \cdot \pi}{3}} = e^{\frac{-2,65 \cdot \pi}{3}} = 62,34 \cdot 10^{-3}, \quad (3.8)$$

$$a^2 = 3,89 \cdot 10^{-3}, \quad a^3 = 24,23 \cdot 10^{-5}.$$

$$I_{max} = 0,75 \cdot 30,86 \cdot \frac{1 - 3,89 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot (1 - 62,34 \cdot 10^{-3} + 3,89 \cdot 10^{-3})} = 30,61 \text{ A}.$$

Значення несинусоїдного первинного фазного струму [5]:

$$I_{1\phi} = 1,05 \cdot I_{il} \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_i} = 1,05 \cdot 30,86 \cdot \frac{0,85}{0,8} = 34,43 \text{ A}. \quad (3.9)$$

Значення несинусоїдного фазного струму через навантаження [5]:

$$I_{2\phi} = \frac{I_{1\phi}}{n} = \frac{34,43}{5,88} = 5,86 \text{ A}. \quad (3.10)$$

Середнє значення струму джерела живлення [5]:

$$I_{сеп} = 1,5 \cdot I_{il} \cdot \frac{\cos^2 \varphi}{\cos \varphi_i} = 1,5 \cdot 30,86 \cdot \frac{0,85^2}{0,8} = 41,81 \text{ A}. \quad (3.11)$$

Дійсне значення фазної несинусоїдної первинної напруги [5]:

$$U_{1\phi} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot U_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot 48 = 22,63 \text{ В.} \quad (3.12)$$

Дійсне значення фазної несинусоїдної напруги на навантаженні [5]:

$$U_{2\phi} = U_{1\phi} \cdot n = 22,63 \cdot 5,88 = 133,05 \text{ В.} \quad (3.13)$$

Вихідна потужність несинусоїдного струму та напруги [5]:

$$S_2 = 3 \cdot U_{2\phi} \cdot I_{2\phi} = 3 \cdot 133,05 \cdot 5,86 = 2,34 \cdot 10^3 \text{ ВА.} \quad (3.14)$$

Потужність несинусоїдного струму та напруг на первинній обмотці трансформатора [5]:

$$S_1 = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} = 3 \cdot 48 \cdot 34,43 = 4,96 \cdot 10^3 \text{ ВА.} \quad (3.15)$$

Типова потужність трансформатора [5]:

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{(4,96 + 2,34) \cdot 10^3}{2} = 3,65 \cdot 10^3 \text{ ВА.} \quad (3.16)$$

Значення активного опору фази навантаження [5]:

$$R_n = \frac{U_{2\phi}}{I_2} \cdot \cos \varphi_i = \frac{127}{5,25} \cdot 0,8 = 19,35 \text{ Ом.} \quad (3.17)$$

Значення наведеного активного опору фази навантаження [5]:

$$R_{\phi n} = \frac{R_n}{n^2} = \frac{19,35}{5,88^2} = 0,56 \text{ Ом.} \quad (3.18)$$

Значення базисного струму [5]:

$$I_{\phi} = \frac{U_i}{3R_{n1}} = \frac{48}{3 \cdot 0,56} = 28,57 \text{ А.} \quad (3.19)$$

Середнє значення струму через зворотні діоди [5]:

$$I_{\text{д}} = 0,02 \cdot I_{\phi} = 0,02 \cdot 28,57 = 0,571 \text{ А.} \quad (3.20)$$

За розрахованими значеннями вхідної напруги інвертора та максимального струму через транзистори та враховуючи пускові струми, визначаємо до застосування наступний тип IGBT-транзисторів фірми SEMITOR – SK100MLI066, параметри яких наведено у табл. 3.2 [36].

Таблиця 3.2 – Характеристики IGBT-транзистора SK100MLI066 [36]

Параметр	Позначення, од.вим.	Значення
Максимальна напруга колектор-емітер	U_{CES} , В	600
Напруга насичення колектор-емітер (при $T = 25^{\circ}\text{C}$)	U_{CE} , В	1,45
Максимальна величина струму колектора, що постійно протікає	I_{Cnom} , А	100
Максимальна величина імпульсного струму через колектор (при $T = 25^{\circ}\text{C}$)	I_C , А	105

Продовження табл. 3.2

Енергія, що виділяється в кристалі при перехідному процесі включення транзистора при заданій напрузі колектор-емітер, напрузі затвора і струм колектора	$E_{on}, \text{Вт}$	2,5
Енергія, що виділяється в кристалі при перехідному процесі вимикання транзистора при заданій напрузі колектор-емітер, напрузі затвора та струмі колектора	$E_{off}, \text{Вт}$	4,2
Тепловий опір кристала транзистора	$R_{th(j-s)}, \text{Ом}$	0,65
Тепловий опір кристала діода	$R_{d(j-s)}, \text{Ом}$	0,90
Струм колектора при нульовій напрузі затвор-емітер	$I_F, \text{А}$	110
Пряме падіння напруги на зворотному діоді	$U_F, \text{В}$	1,35
Енергія розсіювання кристала	$E_{rr}, \text{В}$	1,90
Час включення діода	$t_{d(on)}, \text{нс}$	400
Час відключення діода	$t_{d(off)}, \text{нс}$	350
Постійні часу	$t_f = t_r, \text{нс}$	500
Тривалість відновлення	$t_{rr}, \text{нс}$	150

3.3 Розрахунок і вибір конденсатора

Ємність конденсатора [5]:

$$C = \frac{2}{3} \cdot \frac{U_{1\phi} \cdot \tau}{R_{\phi n} \cdot \Delta U_C} \cdot \left[\ln \left(\frac{1+a}{1+a^3} \right)^2 + \frac{(1-2a) \cdot (1-a^2)}{1+a^3} \right] \quad (3.21)$$

де τ – постійна часу [5]:

$$\tau = \frac{f_{Th}}{f_2} = \frac{0,06}{50} = 0,0012. \quad (3.22)$$

ΔU_C – падіння напруги на конденсаторі [5]:

$$\Delta U_C \leq 0,1 \cdot U_i = 0,1 \cdot 48 = 4,8 \text{ В}. \quad (3.23)$$

Приймаємо припустиме значення напруги на конденсаторі: $\Delta U_C = 4,5$ В.

$$C = \frac{2}{3} \cdot \frac{21,61 \cdot 0,0012}{0,56 \cdot 4,5} \times \left[\ln \left(\frac{1 + 62,34 \cdot 10^{-3}}{1 + 24,23 \cdot 10^{-5}} \right)^2 + \frac{(1 - 2 \cdot 62,34 \cdot 10^{-3}) \cdot (1 - 3,89 \cdot 10^{-3})}{1 + 24,23 \cdot 10^{-5}} \right] = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}.$$

За визначеним значенням обираємо конденсатор силового фільтра конденсатор фірми ELECTRONICON типу E51.L25-682R20, характеристики якого наведено у табл. 3.3 [37].

Таблиця 3.3 – Характеристики конденсатора E51.L25-682R20 [37]

Параметр	Позначення, од.вим.	Значення
Номінальна ємність	C_n , мкрФ	6,8
Номінальна постійна напруга	U_n , В	620
Еквівалентний опір	R_S , МОм	10
Максимальний струм	I_{max} , А	20
Піковий струм	I_S , кА	2
Індуктивність	L , Гн	50
Габаритні розміри	$D \times L$, мм	64x255
Маса	m , кг	0,9

3.4 Розрахунок теплових втрат у силових елементах

Інвертор напруги складається з шести модулів. Втрати в кожному модулі з IGBT-транзисторами можна розділити на:

- втрати у провідному стані, що залежить від колекторного струму та від напруги на включених транзисторах,
- втрати на комутацію та динамічні втрати, які залежать від частоти комутації та швидкодії транзисторів.

Втрати в одному IGBT-транзисторі у провідному стані [5]:

$$P_{ss} = I_{сеп} \cdot U_{CE} \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \varphi_i \right), \quad (3.24)$$

де D – коефіцієнт модуляції, $D = 0,95$,

$$P_{ss} = 41,81 \cdot 1,45 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{0,95}{3 \cdot \pi} \cdot 0,8 \right) = 12,47 \text{ Вт.}$$

Втрати в IGBT-транзисторі при комутації [5]:

$$P_{sw} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot \frac{I_{сеп} \cdot U_i \cdot (t_{c(on)} + t_{c(off)}) \cdot f_{sw}}{2}, \quad (3.25)$$

де $t_{c(on)}$ – час включення транзистора [5]:

$$t_{c(on)} = t_{d(on)} + t_f = 400 + 500 = 900 \text{ нс}, \quad (3.26)$$

$t_{c(off)}$ – час вимкнення транзистора [5]:

$$t_{c(off)} = t_{d(off)} + t_r = 350 + 500 = 850 \text{ нс}, \quad (3.27)$$

f_{sw} – частота комутації, $f_{sw} = 10000$ Гц.

$$P_{sw} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot \frac{41,81 \cdot 48 \cdot (900 \cdot 10^{-9} + 850 \cdot 10^{-9}) \cdot 10000}{2} =$$

$$= 7,9 \text{ Вт.} \quad (3.28)$$

Сумарні втрати в IGBT-транзисторі [5]:

$$P_Q = P_{sw} + P_{ss} = 7,9 + 12,47 = 20,37 \text{ Вт.} \quad (3.29)$$

Втрати зворотного діода у провідному стані [5]:

$$P_{DS} = I_{ep} \cdot U_F \cdot \left(\frac{1}{8} \cdot \frac{D}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \varphi_i \right) \quad (3.30)$$

де I_{ep} – максимальна амплітуда струму через зворотний діод,

$$I_{ep} = I_{ср},$$

$$P_{DS} = 41,81 \cdot 1,35 \cdot \left(\frac{1}{8} \cdot \frac{0,95}{3 \cdot \pi} \cdot 0,8 \right) = 0,569 \text{ Вт.}$$

Втрати на відновлення замикаючих властивостей діода [5]:

$$P_{DR} = \frac{1}{8} \cdot (I_{rr} \cdot U_i \cdot t_{rr} \cdot f_{sw}) \quad (3.31)$$

де I_{rr} – амплітуда зворотного струму через діод, $I_{rr} \approx I_{ср}$,

$$P_{DR} = \frac{1}{8} \cdot (41,81 \cdot 48 \cdot 150 \cdot 10^{-9} \cdot 10000) = 0,376 \text{ Вт.}$$

Результуючі втрати в одному IGBT-транзисторі зі зворотним діодом [5]:

$$P_T = P_Q + P_{DS} + P_{DR} = 20,37 + 0,569 + 0,376 = 21,32 \text{ Вт.} \quad (3.32)$$

Загальні втрати в інверторі з урахуванням кількості транзисторів [5]:

$$P_{in} = 6 \cdot P_T = 6 \cdot 21,32 = 127,89 \text{ Вт.} \quad (3.33)$$

Максимальне значення припустимого перехідного опору охолоджувач-навколишнє середовище [5]:

$$R_{th(s-a)} \leq \frac{T_c - T_a}{P_T} - R_{th(j-s)}, \quad (3.34)$$

де T_c – температура корпусу тепловідвідної пластини, $T_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$,

T_a – температура охолоджуючого повітря, $T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$,

T_j – гранична температура кристала, $T_j = 120 \text{ }^\circ\text{C}$,

$$R_{th(s-a)} \leq \frac{80 - 40}{21,32} - 0,65 = 1,22 \text{ Ом.}$$

Температура кристала IGBT-транзистора [5]:

$$T_{jth} = T_c + P_Q \cdot R_{th(j-s)} = 80 + 20,37 \cdot 0,65 = 93,2 \text{ }^\circ\text{C} \leq 120 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (3.35)$$

Температура кристала зворотного діода [5]:

$$\begin{aligned} T_{j d} &= T_c + (P_{DS} + P_{DR}) \cdot R_{d(j-s)} = 80 + (0,569 + 0,376) \cdot 0,90 = \\ &= 80,9 \text{ }^\circ\text{C} \leq 120 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (3.36)$$

Для охолодження IGBT-транзисторів вибираємо радіатор RAD-DY-KY/5, параметри якого наведено у табл. 3.4 [38]

Таблиця 3.4 – Характеристики радіатора RAD-DY-KY/5

Параметр	Позначення, од.вим.	Значення
Тип радіатора	—	пресований
Довжина	L , мм	50
Ширина	B , мм	40
Висота	D , мм	20
Тепловий опір	R_{th} , К/Вт	5,4
Матеріал	—	алюміній
Оздоблення	—	анодований
Кріплення	—	двонаправленні штифти

4 МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОРІВНЕВОГО ІНВЕРТОРА

4.1 Загальні відомості про багаторівневі інвертори

Інвертор перетворює постійний струм на змінний, що може бути використаний у різних процесах. Інвертор має змогу адаптуватися, що полягає у можливості виробляти змінний струм з будь-яким значенням напруги і значенням частоти, чого можна досягти за допомогою відповідного керування.

Інвертори можуть бути побудовані для різних застосувань та за різних схем – усе це буде визначати форму вихідного сигналу (прямокутний, модифікована синусоїда, багаторівнева синусоїда, чиста синусоїда). Інвертори, що дозволяють отримати «чисту» синусоїду є більш дорогими та складними, що вимагає впровадження додаткової фільтрації та мінімізує значення коефіцієнта гармонійного спотворення. Інвертори, що генерують прямокутну синусоїду є більш доступними за ціною, але менш ефективними, створюють більше «шуму», що означає вище значення коефіцієнту гармонік (рис. 4.1) [39].

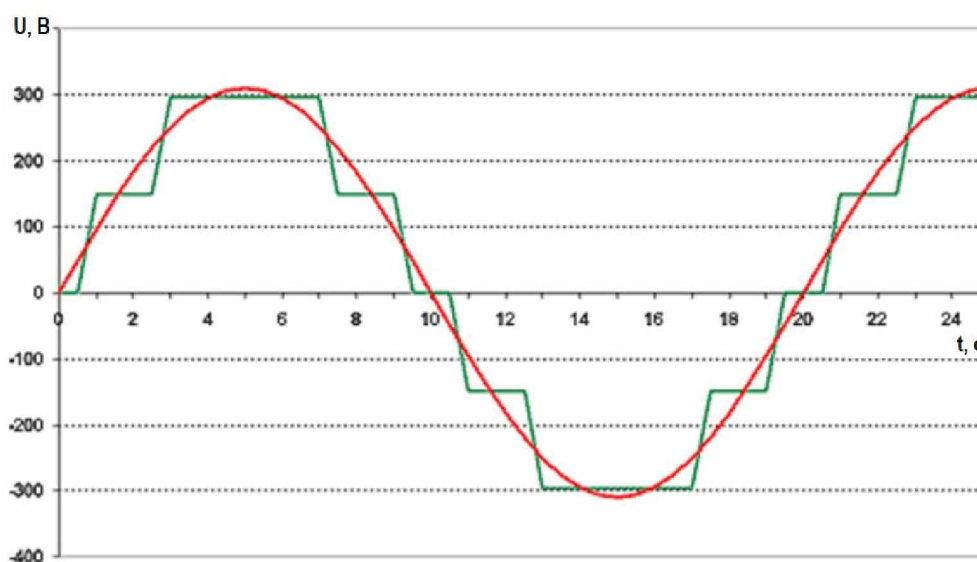


Рисунок 4.1 – Порівняння форми синусоїдної форми напруги і прямокутного (меандру)

Багаторівневі інвертори дозволяють отримати на виході модифіковану синусоїдну хвилю, що найбільше наближається до «чистої» синусоїди. На основі механізмів перемикавання та джерела вхідної напруги багаторівневі інвертори можуть бути сконструйовані у різний спосіб [40]:

- на базі діодів – силові діоди при цьому працюють як простий перемикаючий пристрій, а вихідна напруга шунтується конденсаторами. Такі конструкції можуть реалізувати лише 3-рівневі інвертори через проблеми балансування заряджання конденсаторів.

- на базі транзисторів – для цього застосовують IGBT або MOSFET транзистори, які можуть входити до складу багаторівневих інверторів з використанням каскадних H-мостів.

Серед переваг багаторівневих інверторів можна відзначити [40]:

- забезпечення параметрів якості вихідної напруги,
- менші значення коефіцієнта гармонійного спотворення,
- менший вміст вищих гармонік у вихідній напрузі,
- зменшені вимоги до фільтрації,
- забезпечення передачі високої потужності,
- менші втрати, що виникають при перемиканні.

4.2 Конструювання каскадного багаторівневого інвертора

Для конструювання каскадного багаторівневого інвертора необхідно поєднати декілька інверторних блоків (H-мостів) з окремим джерелом постійного струму, що підключаються до кожного блоку окремо – паралельно або послідовно. Кожен H-міст може виробляти три різні рівні напруги – «позитивну», «нульову», «негативну» – шляхом підключення джерела постійного струму до виходів змінного струму шляхом забезпечення різних комбінацій положення перемикачів S_1 , S_2 , S_3 і S_4 .

Положення перемикачів визначається значенням/наявністю імпульсів, що надходять на силові елементи, та визначає певний рівень вихідної напруги інвертора (рис. 4.2) [41].

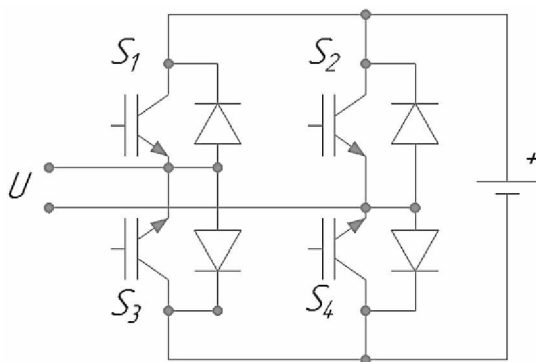


Рисунок 4.2 – Одиночний блок для конструювання каскадного багаторівневого інвертора

4.3 Моделювання у прикладному середовищі Matlab_Simulink

Для здійснення моделювання скористаємось прикладним програмним середовищем Matlab_Simulink, що дозволяє імітувати швидкоплинні процеси у електричних схемах. На рис. 4.3 представлено блочне виконання моделі, що досліджує роботу багаторівневого інвертора [42].

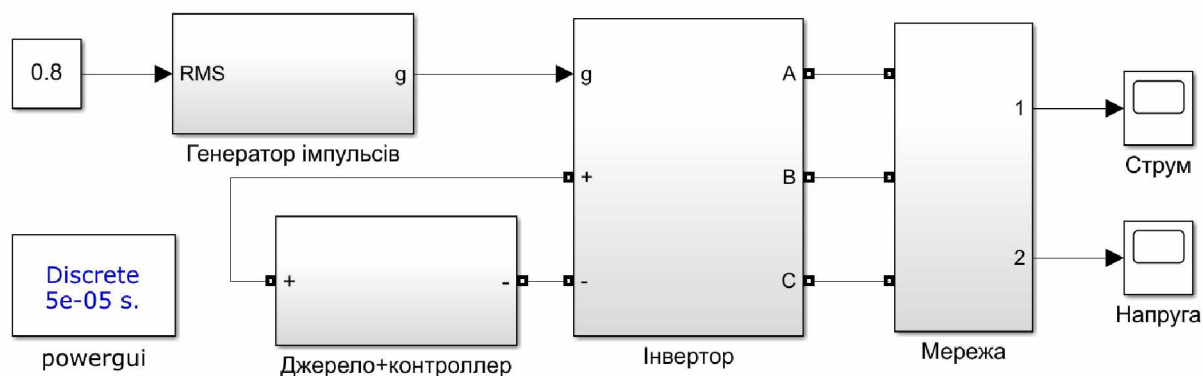


Рисунок 4.3 – Блочне виконання моделі

На рис. 4.4 представлено склад блоку «Генератор імпульсів».

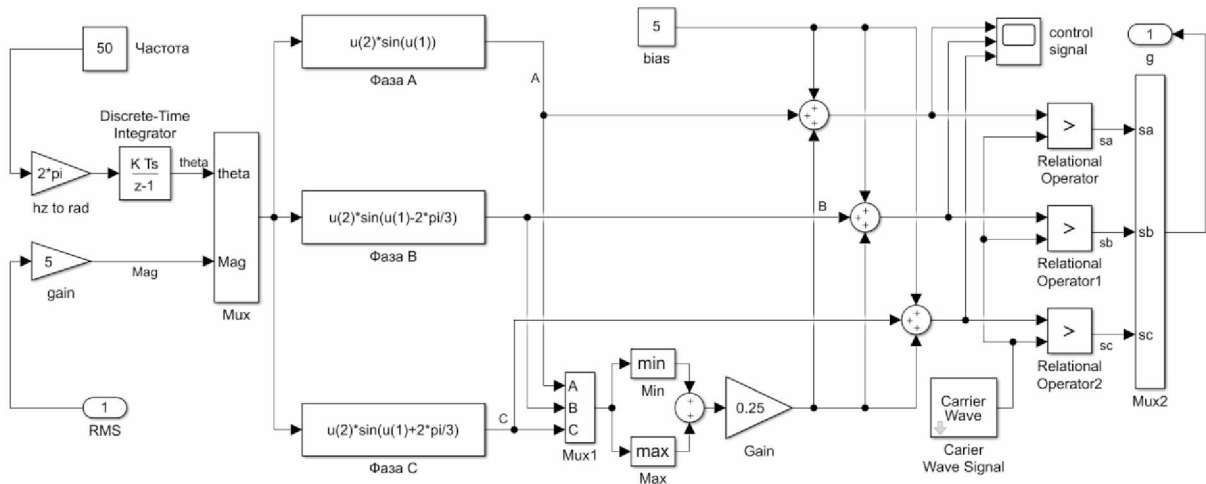


Рисунок 4.4 – Склад блоку «Генератор імпульсів»

Основними компонентами даної схеми є [42]:

- «Частота (Frequency)» – задається значення 50 Гц, яка подається на блок, що перетворює її з Гц у рад/с,
- «Дискретний Інтегратор (Discrete-Time Integrator)» – блок, що інтегрує вхідний сигнал з певним часовим кроком (T_s), згідно з показником K (посиленням).
- «Мультиплексор (Mux)» – використовується для об'єднання кількох вхідних сигналів у один вихідний сигнал (амплітуду «Mag» з інтегрованим сигналом «theta»),
- «Фази A, B, C (Phase A, B, C)» – представляють три різні фази сигналу, що виходять з мультиплексора і пов'язані з трифазним джерелом енергії,
- «Relational Operator» – блоки порівняння, які використовуються для визначення перевищення вхідним сигналом певного порогового значення,
- «Схема управління (Control Signal)» – блок, що генерує сигнал управління на основі порівняння відносного оператора,
- «Carrier Wave Signal» – несучий сигнал, який може бути використаний для модуляції і обробки сигналу.

Принцип функціонування схеми полягати в генерації та контролі імпульсів для подальшої їх передачі або використання в якості частини більшої системи.

На рис. 4.5 представлено склад блоку «Джерело+контроллер». Схема є реалізацією зворотного зв'язку для керованого джерела струму, що використовується для регулювання вихідної потужності і складається з наступних елементів [42]:

- «Кероване джерело струму» – задає вихідний струм схеми і встановлюється відповідно до потреб навантаження,
- «Subsystem1» – блок керування або регулятор, який сприймає вхідні сигнали температури (T) і сонячної інсоляції (S) і відповідно регулює вихідний струм,
- Вимірювальний блок «VM1» і конденсатор «C1» використовуються для стабілізації та фільтрації вихідної напруги схеми,
- Збірка «R1, L, Diode, IGBT» – резистором, індуктивність, діод, біполярний транзистор з ізольованим затвором – використовується для комутації та регулювання вихідної потужності,
- Блок «MPPT (Maximum Power Point Tracking)» реалізує алгоритм, який використовується оптимізації вихідної потужності,

Принцип роботи схеми: система отримує вхідні дані про температуру і сонячне випромінювання, регулятор (Subsystem1) використовує ці дані для оптимізації вихідного струму від керованого джерела струму, схема фільтрації (VM1 і C1) стабілізує вихідну напругу, індуктивність (L), діод і IGBT регулюють і комутують струм для забезпечення максимальної потужності до навантаження, MPPT адаптує роботу схеми для досягнення максимальної вихідної потужності з сонячної панелі, показники напруги і струму візуалізуються за допомогою осцилографа (Scope3) для моніторингу і аналізу.

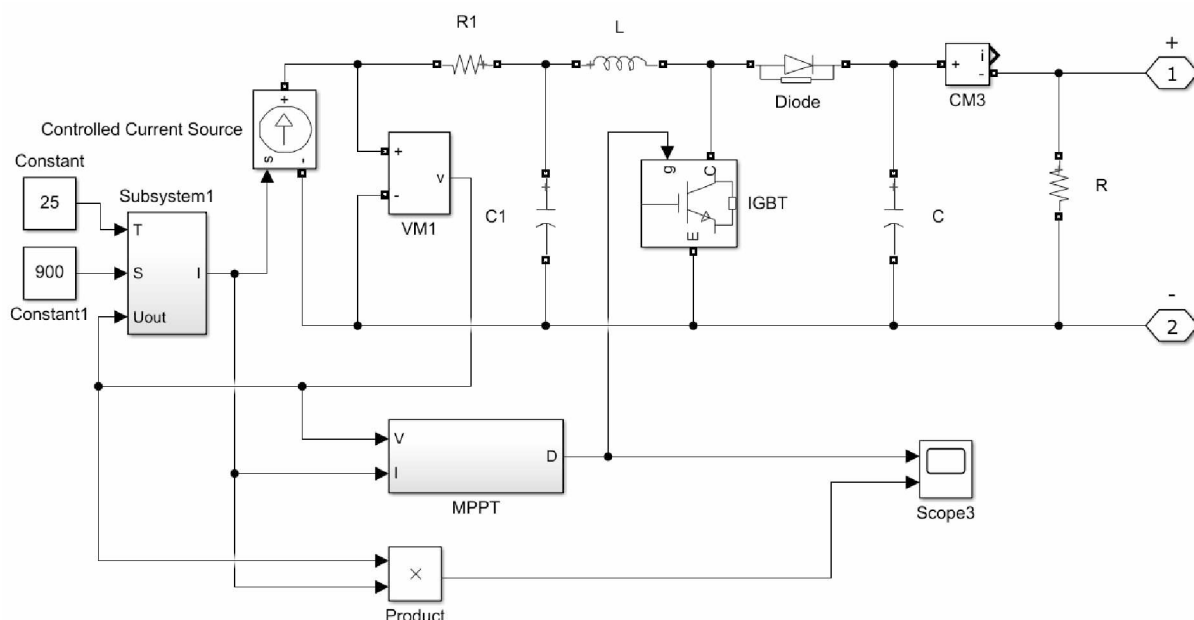


Рисунок 4.5 – Склад блоку «Джерело+контроллер»

На рис. 4.6 представлено склад блоку «Інвертор». Схема являє трифазний інвертор, який використовується для перетворення постійного струму на змінний струм. Основними компоненти схеми є [42]:

- «Силові транзистори (S1–S8)» використовуються для комутації постійного струму в змінний. Кожна з трьох фаз інвертора містить чотири транзистори, які працюють парами для створення змінного струму в кожній фазі,

- «Діоди (D1a–D6c)» слугують для захисту силових транзисторів від зворотної напруги, яка може виникнути внаслідок індуктивних навантажень в системі,

- «Конденсатори (C1–C4)» використовуються для згладжування вхідної постійної напруги і як елементи накопичення електричної енергії у інверторі,

Принцип роботи схеми наступний: простійний струм подається на вхід інвертора з конденсаторами (C1–C4); транзистори (S1–S8) комутуються з високою частотою, щоб створити три синусоїдальні хвилі змінного струму з відповідною фазою для кожної фази інвертора; діоди (D1a–D6c) забезпечують захист від зворотної напруги, яка може виникати

при відключенні транзисторів; згенерований змінний струм може бути використаний для живлення трифазних навантажень у електричній мережі. Керування інвертором вимагає точної синхронізації комутації транзисторів для забезпечення правильної форми змінного струму та для уникнення короткого замикання. Таке керування зазвичай виконується за допомогою мікроконтролера або спеціалізованого інтегрального схеми-керування.

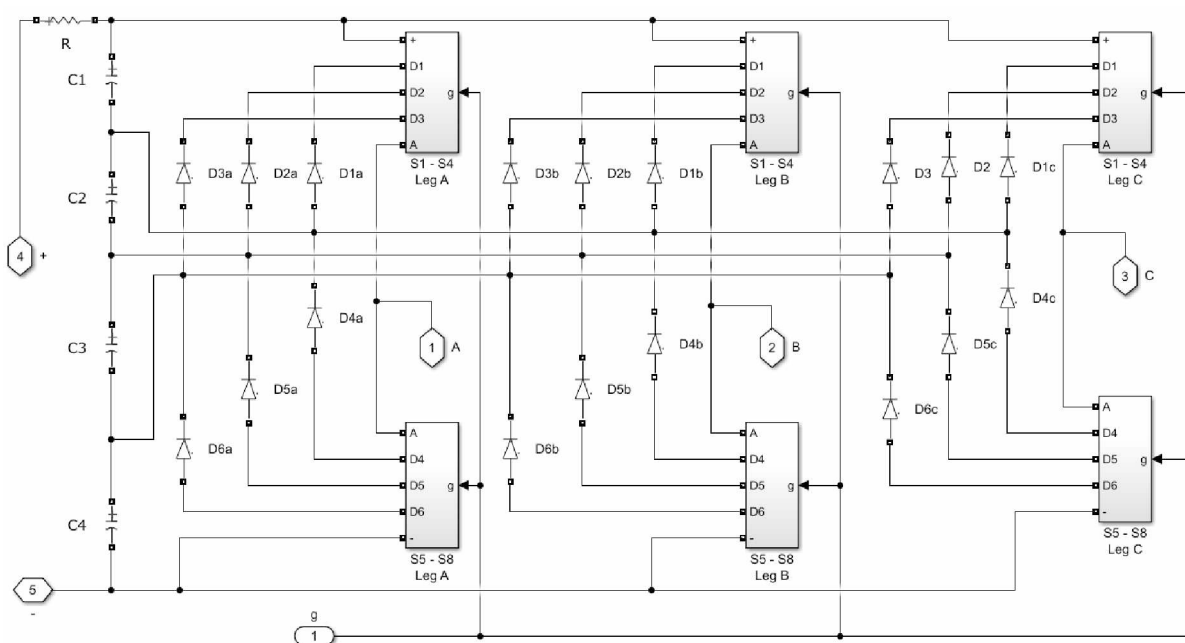


Рисунок 4.6 – Склад блоку «Інвертор»

На рис. 4.7 представлено склад одного з блоків з силовими елементами – IGBT-транзисторами.

Результати моделювання представлено графічно.

На рис. 4.8 показано форми хвиль напруги на виході інвертора під час регулювання.

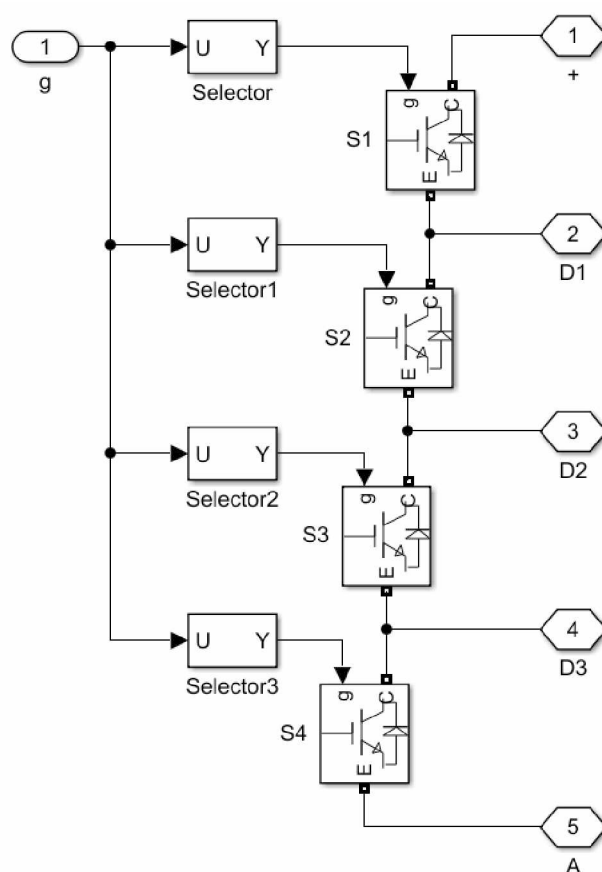


Рисунок 4.7 – Склад блоку з силовими елементами (IGBT-транзисторами)

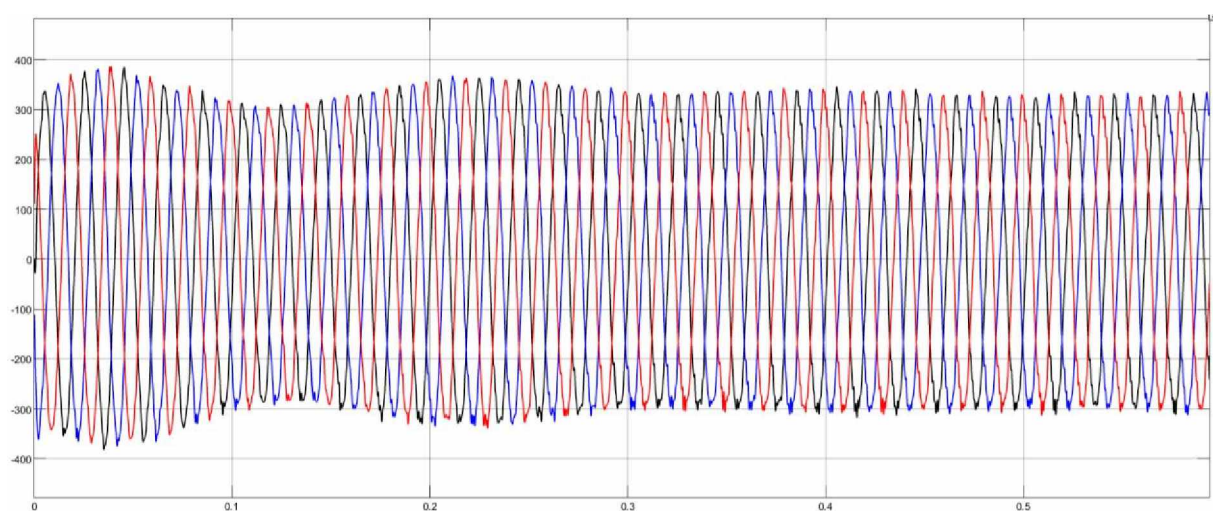


Рисунок 4.8 – Форми хвиль напруги на виході інвертора під час регулювання

На рис. 4.9 показано графік зміни коефіцієнта несинусоїдності під час регулювання.

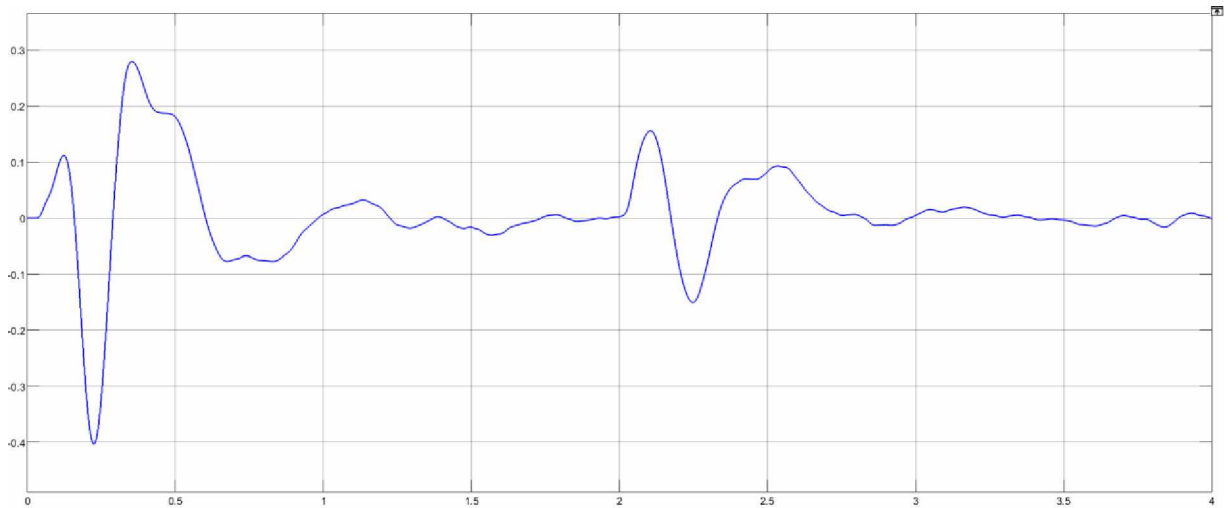


Рисунок 4.9 – Графік зміни коефіцієнта несинусоїдності під час регулювання

На рис. 4.10 показано характеристики зміни активної та реактивної потужності під час регулювання.

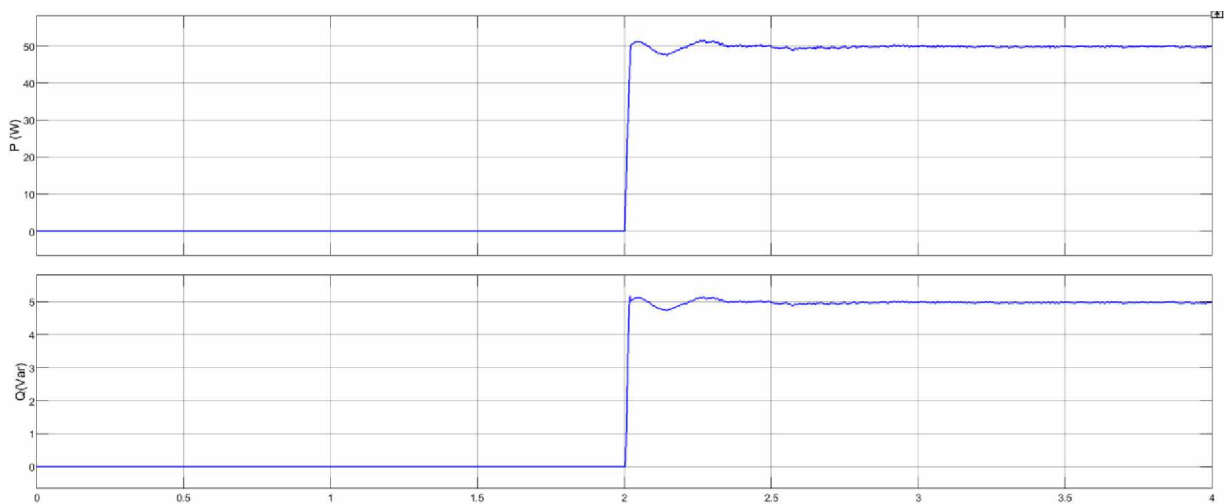


Рисунок 4.10 – Характеристики зміни активної та реактивної потужності під час регулювання

Моделювання здійснене за допомогою програми Matlab допомогло отримати кілька рівнів напруги навантаження, що вимагає використання кількох блоків з силовими елементами. Конструкція реалізована з використанням біполярних транзисторів з ізольованим затвором, що

являють собою комутаційні пристрої та симетричних джерел живлення постійного струму.

Для реалізації широтно-імпульсної модуляції було визначено частоту перемикавання на рівні 2,5 кГц.

Складна схема є досить гнучкою для керування на основі техніки низькочастотної модуляції.

Ключовим елементом у генерації сигналів вихідної напруги є полюсні напруги, кожна з яких зсувається на 120° для генерації збалансованої трифазної синусоїдальної вихідної напруги. Для генерації негативної складової вихідної напруги було використано Н-міст, що вимагало збільшення кількості перемикачів. Цей недолік нівелюється отриманням близької до синусоїдної форми сигналу напруги.

Відповідно до станів перемикавання схема виробляє трифазну симетричну лінійну напругу, кожна з яких має певні рівні та фазовий зсув у 120° . Крім того комутаційні сигнали пари перемикачів не можуть подаватися одночасно, що дозволяє зменшити втрати при перемиканні.

Оскільки схема використовує лише один несучий сигнал порівняно з модулюючим сигналом, кількість рівнів вихідної напруги зберігає своє значення, навіть якщо індекс модуляції зменшується.

ВИСНОВКИ

Широке застосування у інверторах силової електроніки, що живлять мережі, у яких наявні нелінійні споживачі призводить до інтенсивної генерації вищих гармонік. Ці гармоніки можуть викривлювати форму напруги та/або струму, що негативно позначається на зниженні ефективності роботи електричного обладнання. Це також призводить до підвищених втрат енергії, підвищенні температури окремих компонентів енергетичної системи, створює електромагнітні перешкоди та обмежуються можливості по управлінню параметрами споживачів.

У роботі було здійснено детальний аналіз параметрів роботи систем, що містять силові елементи для кращого розуміння її стану. Це дало підстави для розробки стратегій зниження ризиків пов'язаних з виробництвом та шкідливими наслідками наявності гармонічних коливань.

Розроблена конструкція багаторівневого інвертора дозволила значно знизити ступінь наявності гармонік. Вибір кутів перемикання силових елементів за допомогою теоретичного методу дозволило зменшити коефіцієнт гармонійного спотворення і конкретних гармонійних складових у вихідній напрузі. Створена конструкція гарантує, що коефіцієнт гармонійного спотворення у вихідній напрузі по всьому частотному спектру залишається нижчим за 5%, що відповідає вимогам нормативних стандартів. Конструкція багаторівневого інвертора продемонструвала потенційні можливості застосування в різноманітних сферах: системах відновлюваної енергії, електричних транспортних засобів та інших.

Розробка комп'ютерної моделі дозволила візуалізувати потенційні шляхи досягнення мінімального значення коефіцієнту гармонійного спотворення вихідної напруги, досліджуючи поведінку системи в реальному часі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сенько В.І, Трубіцин К.В., Чибеліс В.І. Інвертори і перетворювачі частоти: монографія – Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. – 300 с.
2. Bimal K. Bose. Modern Power Electronics and AC Drives. – Prentice Hall PTR, 2002. – 738 p.
3. Колонтаєвський Ю. П. Перетворювальна техніка в нетрадиційній та відновлювальній електроенергетиці: навч. посібник / Ю.П. Колонтаєвський, Д.В. Тугай; Харків, нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 67 с.
4. Simonka V. Thermal Oxidation and Dopant Activation of Silicon Carbide. PhD, 2018.
5. Казачковський М.М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: навч. посіб. [Електронний ресурс] / М.М. Казачковський; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Електрон. текст, дані. – 2-ге вид., випр. та допов. – Дніпро: НГУ, 2017. – 324 с.
6. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода: навч. посібник / М.В. Загірняк, Т.В. Коренькова, А.П. Калінов, А.І. Гладир, В.Г. Ковальчук. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – Харків: Видавництво «Точка», 2017. – 206 с.
7. Шавьолкін О.О., Наливайко О.М. Перетворювальна техніка: навч. посіб. Краматорськ: ДДМА, – 2008. – 328 с.
8. Jain H., Rajawat S., Agrawal P. Comparision of wide band gap semiconductors for power electronics applications. International Conference on Recent Advances in Microwave Theory and Applications – 2008. doi:10.1109/amta.2008.4763184.
9. Hudgins J.L. Power Electronic Devices in the Future. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 1(1), (2013). p. 11–17. doi:10.1109/jestpe.2013.2260594.

10. Yaghoobi J., Zare F., Solatalkaran D. Harmonic Emissions in 0-9 kHz Frequency Range and Transient Effects in Grid-Connected Inverters Utilised in Solar Farms. 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). 2020. doi:10.1109/ichqp46026.2020.917792.
11. Andrade S., Manjunatha Y.R. A 31-level inverter with optimal number of switches for power applications. IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT). 2016. doi:10.1109/rteict.2016.7807816.
12. Tan L., Li Y., Wang P. An Overmodulation Method for Space Vector PWM Current Source Inverters. 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2007. doi:10.1109/iciea.2007.4318847.
13. Mahfuz-Ur-Rahman A. M., Islam M. R., Muttaqi K. M., Sutanto D. An Advance Modulation Technique for Single-Phase Voltage Source Inverter to Integrate SMES into Low Voltage Distribution. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1–1. 2018. doi:10.1109/tasc.2018.2882381.
14. Amorim W.C.S., Mendonca D.C., Callegari J.M.S., Silva M.P., Pereira H.A., Cupertino A.F. Comparison of Current Grid Controllers in a DG Inverter with Grid Harmonic Distortion. 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON). 2018. doi:10.1109/induscon.2018.8627162.
15. Fischer J.R., Martinez J.F., Judewicz M.G., Echeverria N.I., Gonzalez S.A. Robust predictive current control with harmonic compensators for grid-connected VSI. XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC). 2017. doi:10.23919/rpic.2017.8211642.
16. Micallef A., Apap M., Spiteri-Staines C., Guerrero J. M. Mitigation of Harmonics in Grid-Connected and Islanded Microgrids Via Virtual Admittances and Impedances. IEEE Transactions on Smart Grid, 1–11. 2015. doi:10.1109/tsg.2015.2497409.

17. Aworo O.J., Mather B. Experimental Determination of PV Inverter Response to Grid Phase Shift Events. IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). 2018. doi:10.1109/pesgm.2018.8586118.
18. Shah S., Sensarma P.S. Three Degree of Freedom Robust Voltage Controller for Instantaneous Current Sharing Among Voltage Source Inverters in Parallel. IEEE Transactions on Power Electronics, 25(12). 2010. p. 3003-3014. doi:10.1109/tpel.2010.2050150.
19. Umar M.F., Easley M., Nun B., Khan A., Shadmand M.B., Bayhan S., Abu-Rub H. Single-Phase Grid-Interactive Inverter With Resonance Suppression Based on Adaptive Predictive Control in Weak Grid Condition. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 3(3). 2022. p. 809-820. <https://doi.org/10.1109/jestie.2021.3103675>.
20. N. Mohan, M. Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications and Design. Hoboken, NJ: Wiley, 1995.
21. Попович М.Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
22. Шавьолкін О.О. Енергетична електроніка: навчальний посібник / О.О. Шавьолкін. – К.: КНУТД, 2017. – 396 с.
23. Гетьманчук Ю.П., Братичак М.М. Хімія і технологія полімерів: Підручник. – Львів: Бескид Біт, 2006. – 496 с.
24. Шавьолкін О.О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. посібник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, – 2015. – 403 с.
25. [Електронний ресурс]. – <https://www.powerctc.com/en/node/5028>
26. Енергетична електроніка. Жуйков В.Я., Рогаль В.В., Будьонний О.В., Пілінський В.В. та інші. Київ, 2008. Електронний підручник.
27. Руденко В.С. Промислова електроніка / В.С. Руденко, В.Я. Ромашко, В.В. Трифонюк. – К.: Либідь, 1993. – 432 с.

28. Holmes D.G. Pulse Width Modulation for Power Converters - Principle and Practice / D.G. Holmes, T.A. Lipo. – New York, USA // IEEE Series on Power Engineering, IEEE Press/Wiley InterScience, 2003. – 744 p.

29. Багаторівневий інвертор напруги з амплітудною широтно-імпульсною модуляцією / Т.О. Терещенко, В.О. Беженар, М.Ю. Білошицький // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 4. – С. 81-83.

30. Козакевич І.А. Предиктивна система керування трифазним інвертором напруги // А. Козакевич, К. В. Будніков // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук, праць. – Кривий Ріг, 2021. – Вип. 52. – С. 77-82. DOI: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-77-82.

31. Квітка С.О. Силові електронні пристрої в системах керування: навчальний посібник для здобувачів вищої освіти / С.О. Квітка. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2021. – 180 с.

32. Timbus A., Liser M., Teodorescu R., Rodriguez P., Blaabjerg F. Evaluation of current controllers for distributed power generation system. IEEE Transactions on power electronics. 2009. V.24, № 3. P. 654-664.

33. Казачковський М.М. Керовані випрямлячі. – Дніпропетровськ: НГА України, 1999. – 228 с.

34. Квітка С.О. Електроніка та мікросхемотехніка: підручник / С.О. Квітка. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. – 223 с.

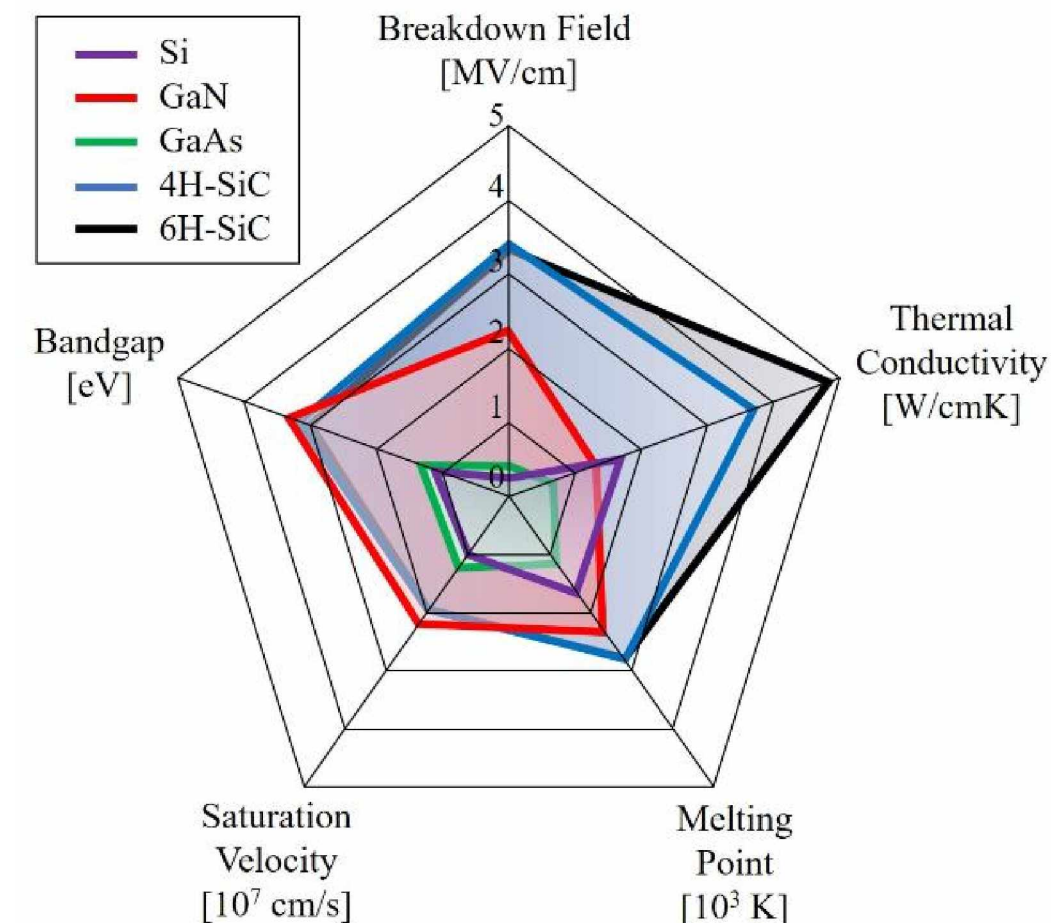
35. Нерубацький В.П., Плахтій О.А., Гордієнко Д.А. Енергоефективні топології та алгоритми модуляції в автономних інверторах напруги: монографія. – Харків: ТОВ «Планета-Прінт», 2021. – 248 с.

36. [Електронний ресурс]. – <https://tsdrive.com.ua/index.php?id=106>

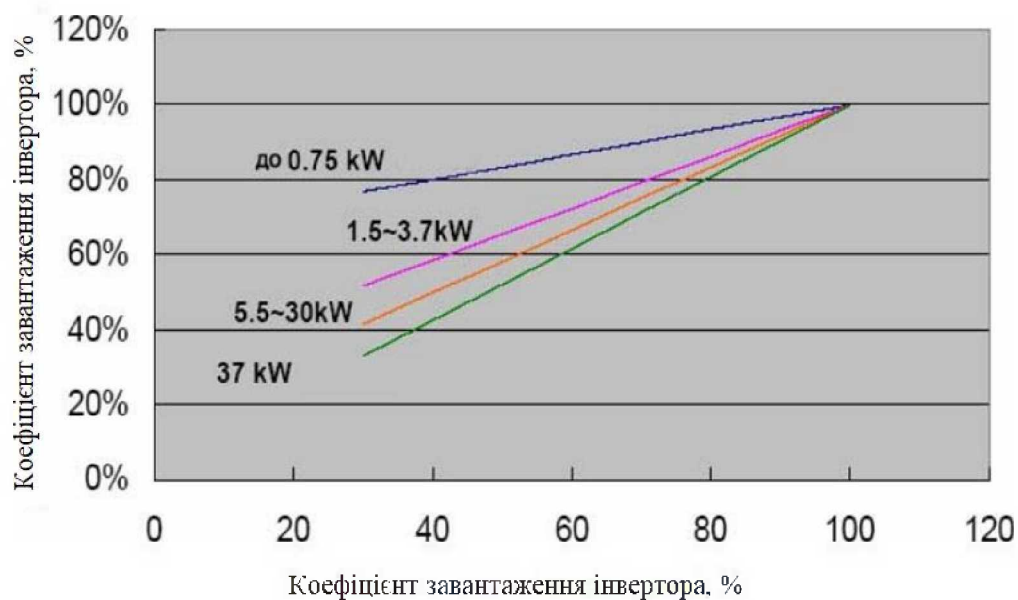
37. [Електронний ресурс]. – https://www.electronicon.com/fileadmin/inhalte/PDF-Dateien/Kataloge_und_Broschueren/200.003-020080_E51-55.pdf

38. [Електронний ресурс]. – <https://justas-electronics.com.ua/rad-dy-ky5/>
39. Силові напівпровідникові прилади і перетворювачі електричної енергії: навч. посіб. / К.К. Побєдаш, В.А. Святненко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 244 с.
40. Перетворювальна техніка. Підручник: Ч. 2/ Ю.П. Гончаров, О.В. Будьонний, В.Г. Морозов та ін., За ред. В.С. Руденка. – Харків: Фоліо, 2000. – 360 с.
41. Пристрої перетворювальної техніки: конспект лекцій / укладач А.І. Новгородцев. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 124 с.
42. S.J. Chapman. MATLAB Programming for Engineers. Thomson, 2004. – 592 p.

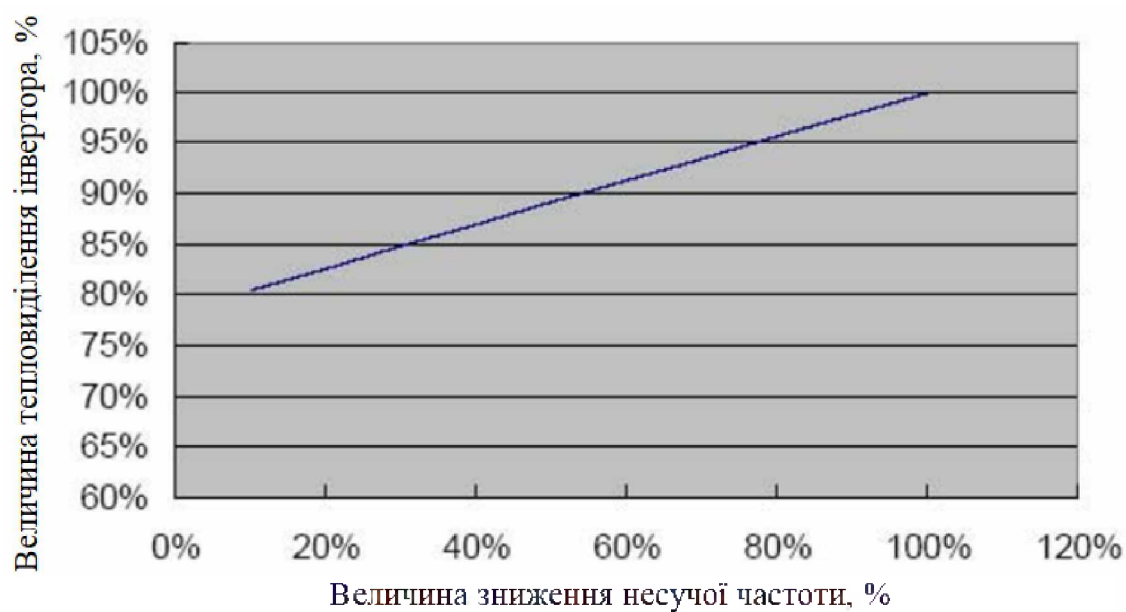
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА



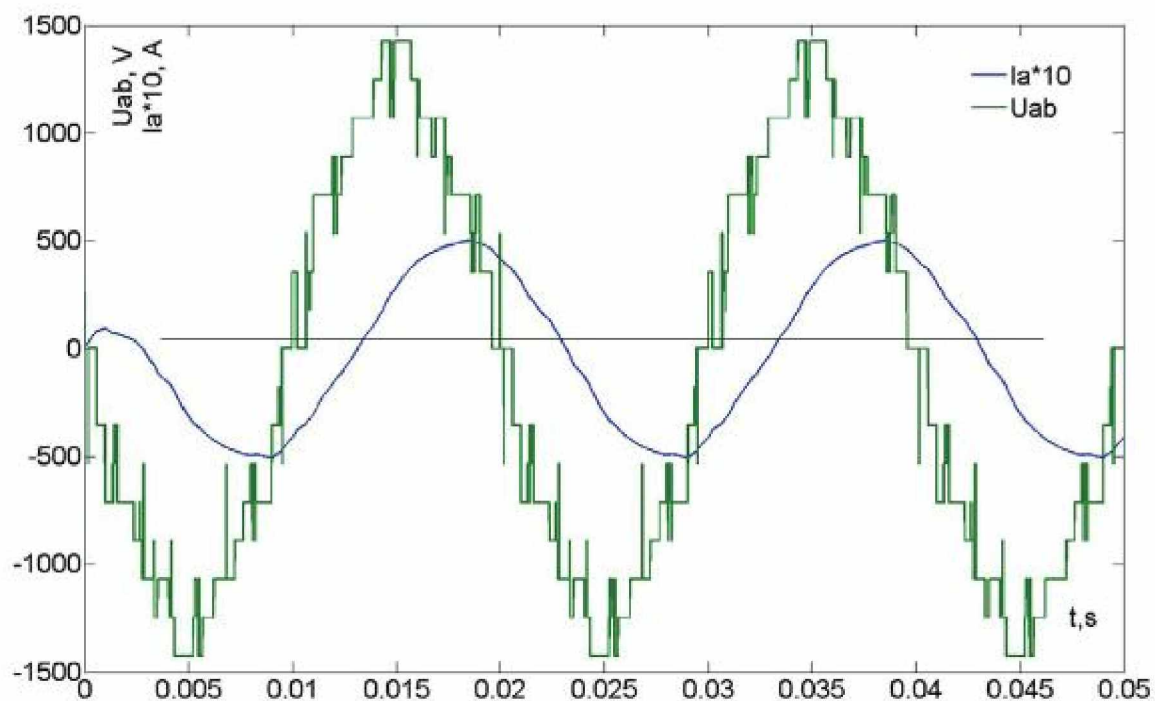
Основні фізичні властивості деяких напівпровідників: «Bandgap» – ширина забороненої зони, «Breakdown field» – зона електричного пробою, «Saturation velocity» – гранична швидкість носіїв заряду у матеріалі, «Thermal conductivity» – теплопровідність, «Melting Point» – температура плавлення



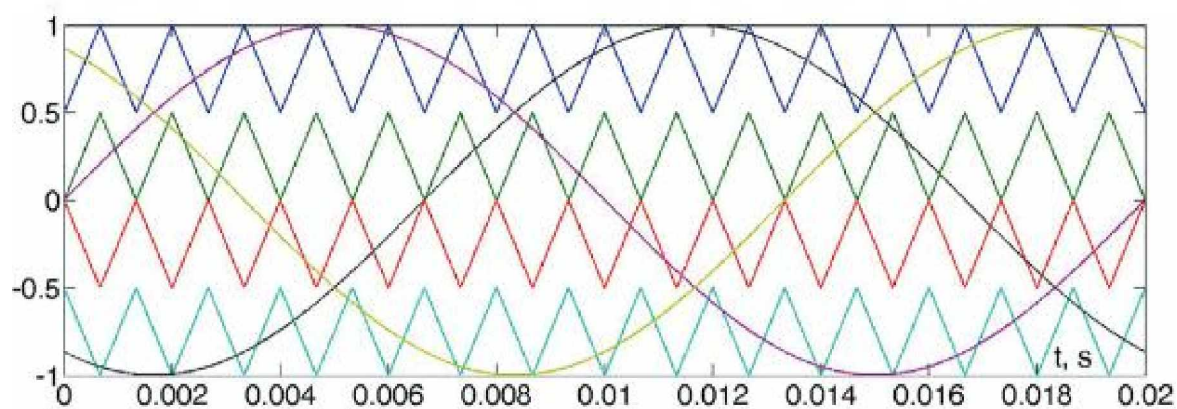
Графік залежності тепловиділення інвертора від коефіцієнта його завантаження



Графік залежності величини тепловиділення від значення несучої частоти



Вплив наявності гармонік на форму сигналу вихідної напруги і струму



Результати застосування фазової опозиції при формуванні ШІМ

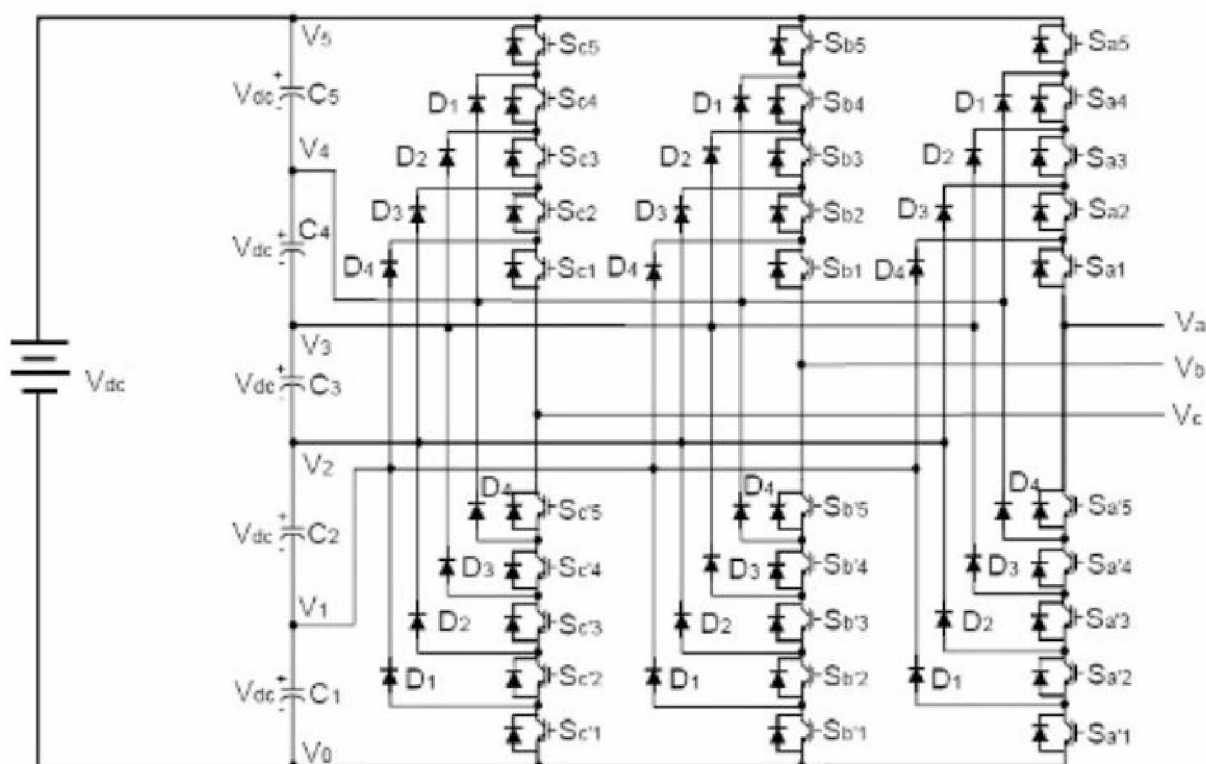
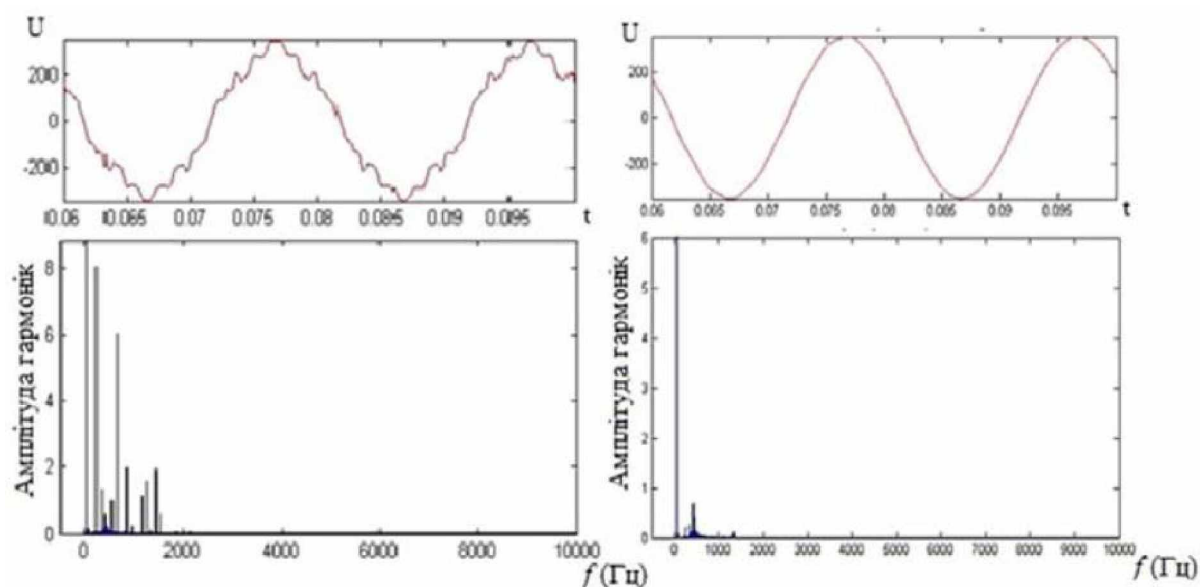
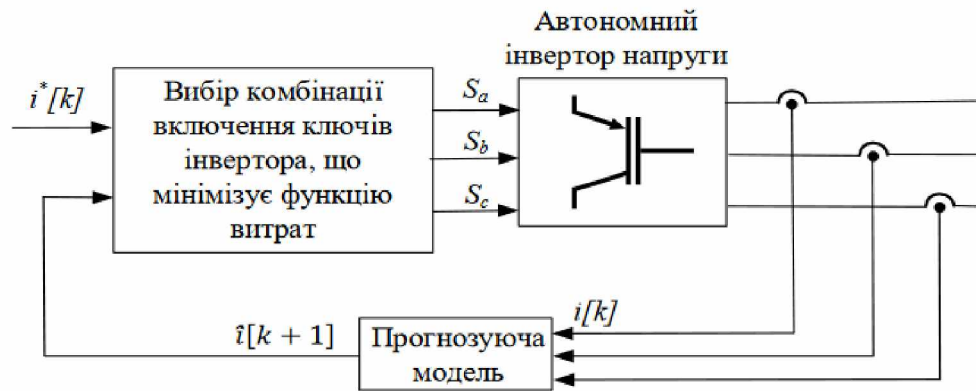


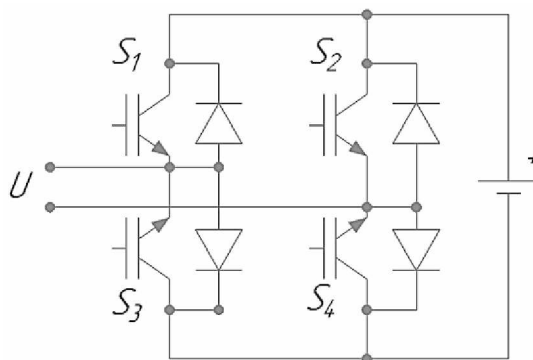
Схема багаторівневого інвертора напруги з амплітудною ШІМ



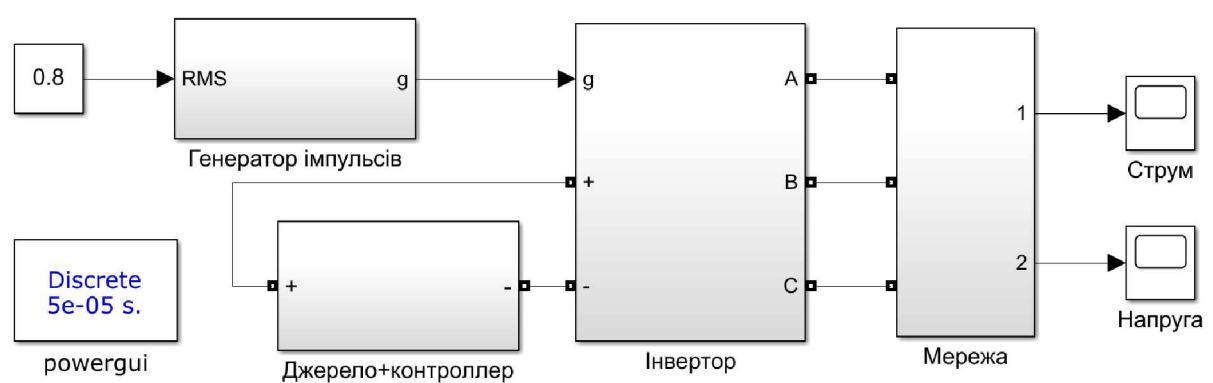
Результати застосування багаторівневого інвертора напруги з амплітудною ШІМ



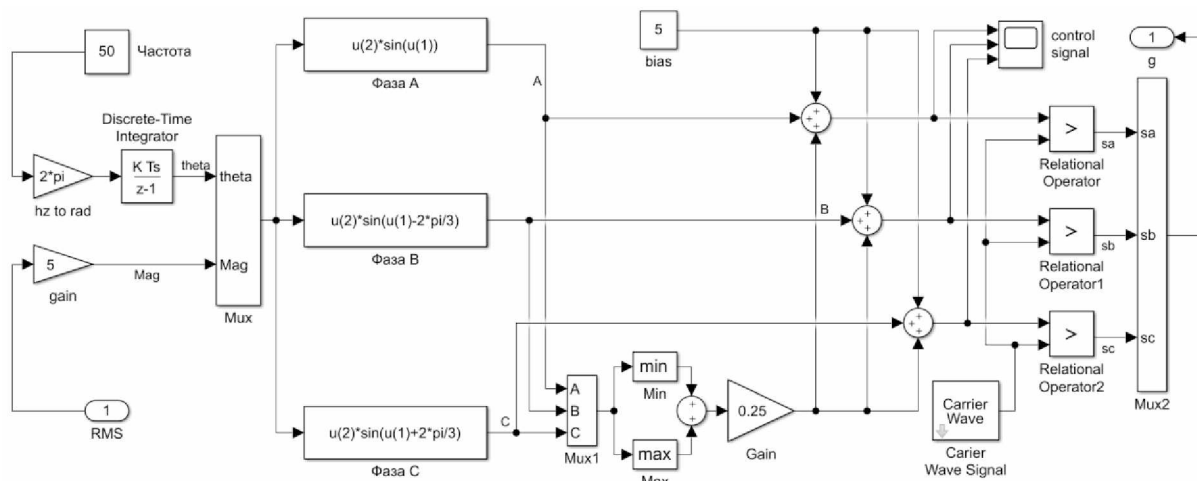
Загальна структура прогнозного керування струмом трифазного інвертора напруги



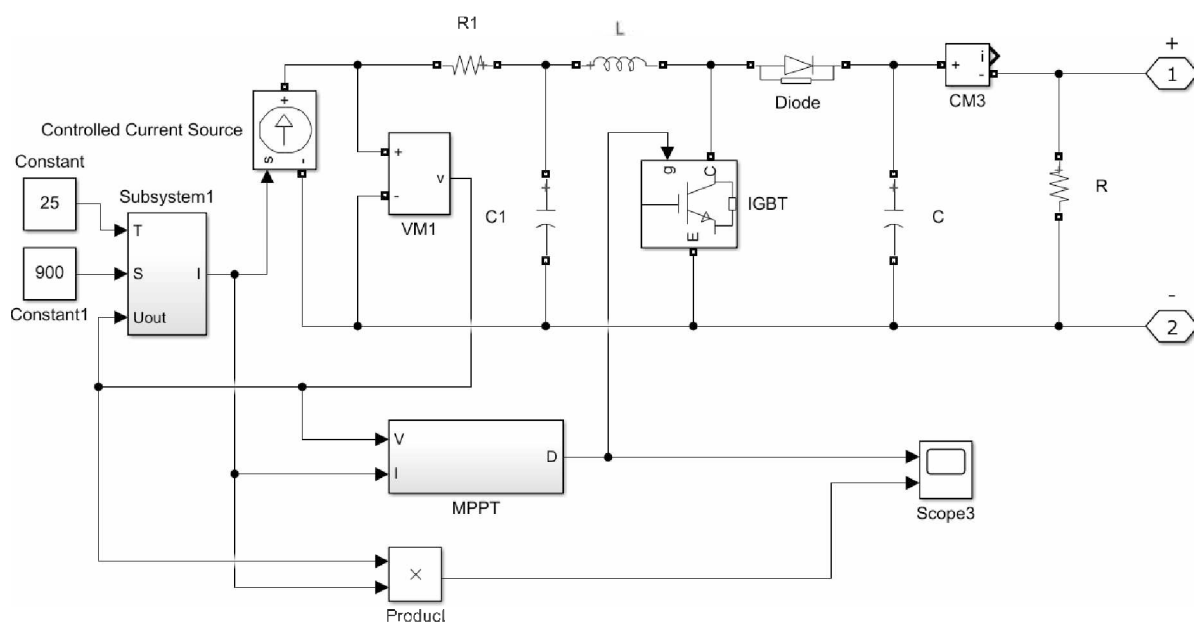
Одиночний блок для конструювання каскадного багаторівневого інвертора



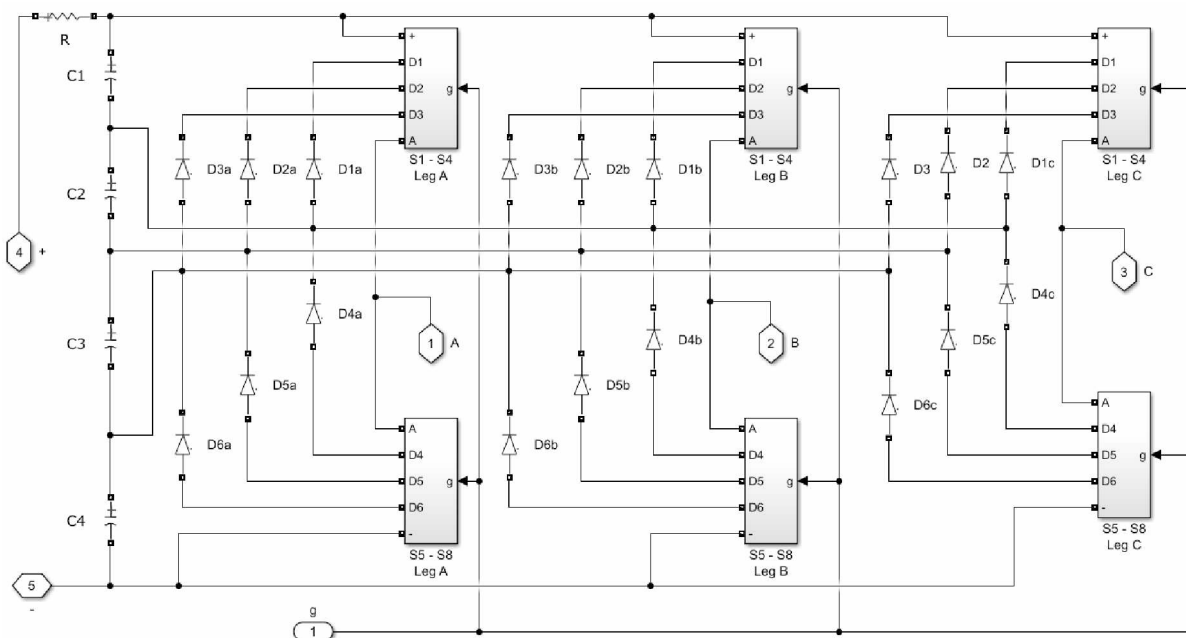
Блочне виконання моделі



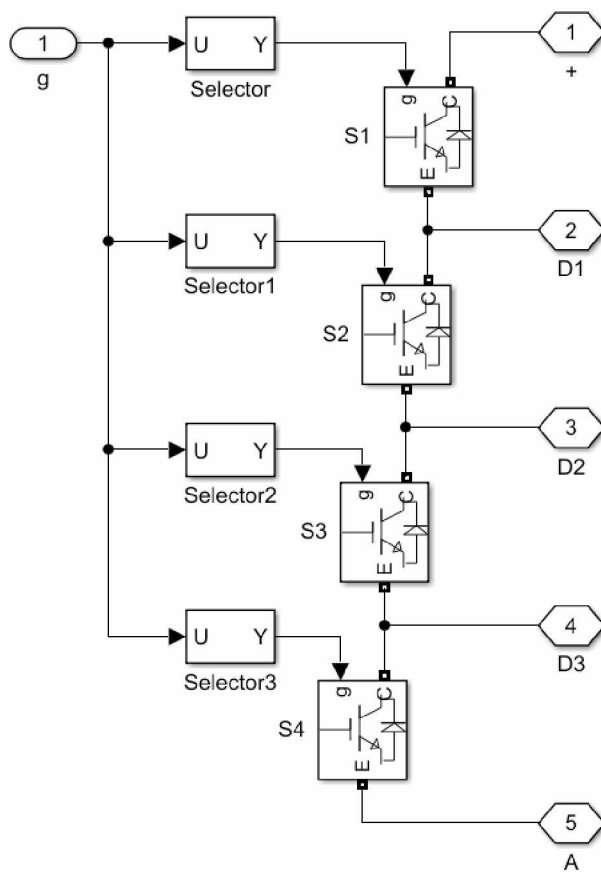
Склад блоку «Генератор імпульсів»



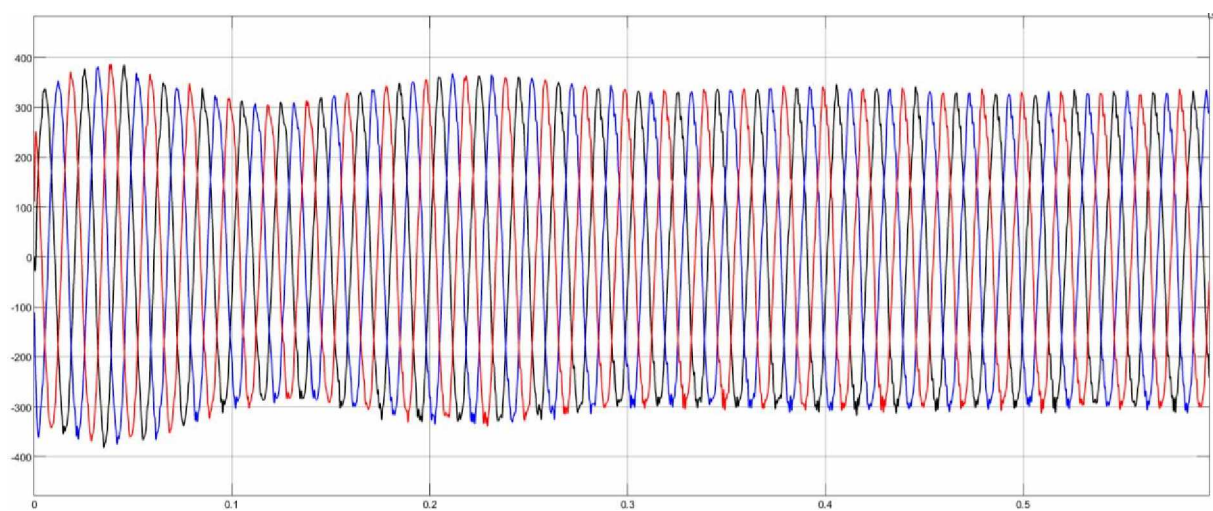
Склад блоку «Джерело+контроллер»



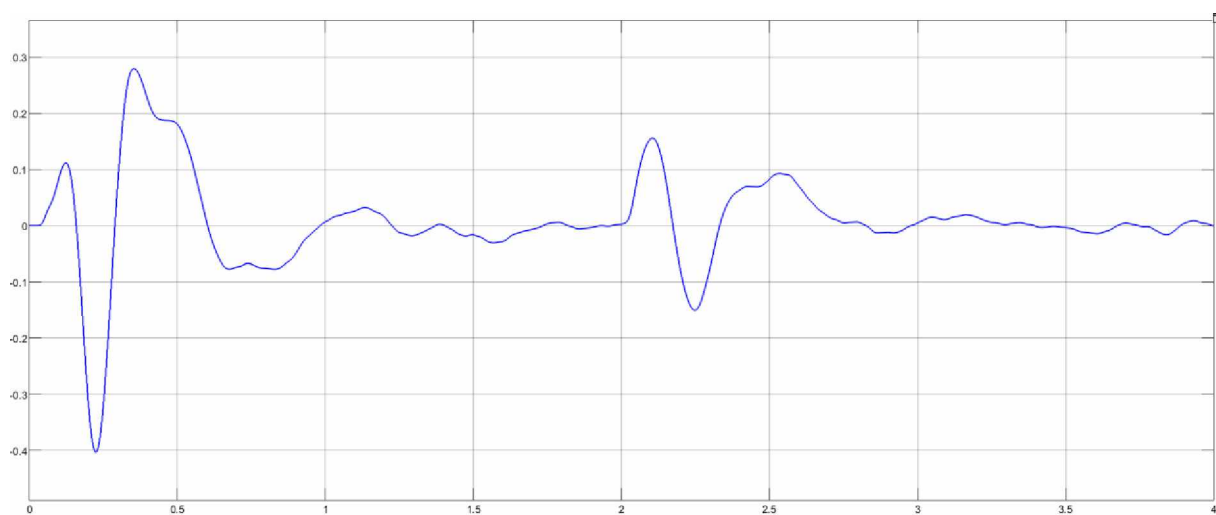
Склад блоку «Інвертор»



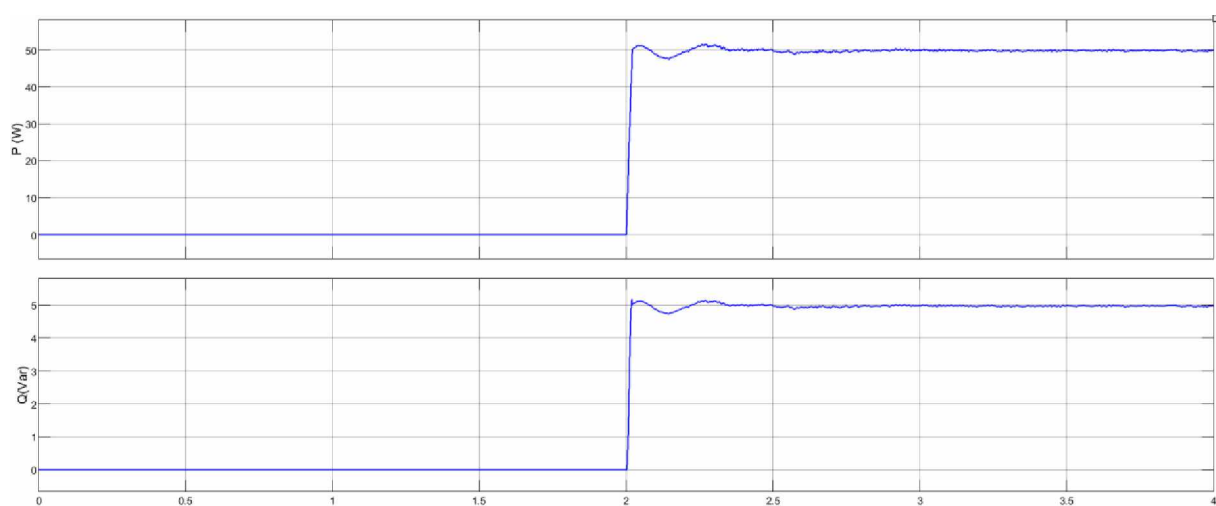
Склад блоку з силовими елементами (IGBT-транзисторами)



Форми хвиль напруги на виході інвертора під час регулювання



Графік зміни коефіцієнта несинусоїдності під час регулювання



Характеристики зміни активної та реактивної потужності під час регулювання

ДОДАТОК Б

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____