

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**С. М. Левицький, В. С. Бомбик**

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ  
МЕРЕЖЕВИМ БАГАТОРІВНЕВИМ  
ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2020

УДК 621.314.572(043.3)

ЛЗ7

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 28.11.2019 р.).

Рецензенти:

**М. Й. Бурбело**, доктор технічних наук, професор

**О. В. Садовой**, доктор технічних наук, професор

**Левицький, С. М.**

ЛЗ7 Система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги : монографія / С. М. Левицький, В. С. Бомбик. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 84 с.

ISBN 978-966-641-788-9

В монографії розглядаються питання вдосконалення системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги при роботі з сонячним модулем та мережею, що дозволяє покращити якість електроенергії та підвищити ефективність роботи інвертора. Подано огляд класичних систем керування мережевими багаторівневими інверторами напруги та запропоновано нові рішення. Монографія розрахована на фахівців галузі електроенергетики, а також може бути корисною студентам та аспірантам вузів відповідного спрямування.

УДК 621.314.572(043.3)

ISBN 978-966-641-788-9

© С. Левицький, В. Бомбик, 2020

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	5
ВСТУП .....	6
Розділ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИМИ МЕРЕЖЕВИМИ ІНВЕРТОРАМИ НАПРУГИ.....	7
1.1 Аналіз систем керування багаторівневими інверторами напруги в системах електропривода .....	7
1.2 Аналіз систем керування інверторами напруги із застосуванням алгоритму визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем .....	14
1.3 Аналіз систем керування мережевими багаторівневими інверторами напруги фотоелектричних установок .....	19
Розділ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИМИ МЕРЕЖЕВИМИ ІНВЕРТОРАМИ НАПРУГИ .....	27
2.1 Математична модель системи керування з врахуванням напруги, частоти та активної потужності електричної мережі .....	29
2.2 Математична модель системи керування з врахуванням параметрів напруги, частоти електричної мережі, активної потужності та температури сонячного модуля .....	36
2.2.1 Вплив температури сонячної панелі на її вихідну потужність .....	37
2.3 Математична модель системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги з обмеженням намагнічувального струму .....	39

Розділ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВИМ БАГАТОРІВНЕВИМ ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ .....	42
3.1 Комп'ютерне моделювання системи з врахуванням напруги, частоти та активної потужності електричної мережі .....	42
3.2 Комп'ютерне моделювання системи керування з врахуванням напруги, частоти, активної потужності електричної мережі та температури сонячного модуля.....	49
Розділ 4 МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВИМ БАГАТОРІВНЕВИМ ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ .....	56
4.1 Мікропроцесорний пристрій системи керування мережесим багаторівневим інвертором напруги .....	57
4.1.1 Алгоритм визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем.....	60
4.1.2 Алгоритм формування сигналів для системи комутації....	63
ВИСНОВКИ.....	66
ЛІТЕРАТУРА .....	67
ДОДАТОК А КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВИМ БАГАТОРІВНЕВИМ ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ ТА ЇЇ НАЛАШТУВАННЯ .....	78
ДОДАТОК Б ПІДПРОГРАМА АЛГОРИТМУ ІНКРЕМЕНТНОЇ ПРОВІДНОСТІ.....	81
ДОДАТОК В ПІДПРОГРАМА ТЕМПЕРАТУРНОГО АЛГОРИТМУ .....	83

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АІН	– автономний інвертор напруги
АЦП	– аналого-цифровий перетворювач
БІН	– багаторівневий інвертор напруги
БОК	– блок обчислення квазіекстремуму
ВАХ	– вольт-амперна характеристика
ДО	– датчик освітленості
ДН	– датчик напруги
ДС	– датчик струму
ДМП	– датчик магнітного потоку
ДТ	– датчик температури
КС	– контролер скидання
НЕ	– накопичувач енергії
ПД	– пропорційно-інтегрально-диференціальний (закон регулювання)
ППП	– пакет прикладних програм
СМ	– сонячний модуль
СК	– система комутації
МБІН	– мережевий багаторівневий інвертор напруги
ШІМ	– широтно імпульсна модуляція

## ВСТУП

За останні роки використання відновлюваних джерел електроенергії значно зросло, зокрема все більшу популярність здобувають сонячні електростанції. Як наслідок, зросло виробництво тонкоплівкових сонячних модулів [1]. Для формування вихідної змінної напруги в якості узгоджувальних пристроїв значну популярність здобули багаторівневі мережеві інвертори напруги, що виготовляються серійно [2]. Основною перевагою багаторівневих інверторів перед однорівневими є покращена форма вихідної напруги, менші втрати в силовій частині та покращена електромагнітна сумісність [3]. Але є й недоліки: збільшення кількості силових ключів, ускладнена система керування комутацією та необхідність адаптації до вимог існуючої електричної мережі при використанні їх в сонячних електростанціях.

Багаторівневі інвертори напруги при роботі в сонячних електростанціях мають дві основні функції: формування синусоїдального струму та напруги на своєму виході для віддачі в мережу; зменшення рівня гармонік [4].

На сьогоднішній день існують різні системи керування мережевими багаторівневими інверторами напруги. Зокрема, при роботі з сонячним модулем використовуються системи керування із застосуванням алгоритму пошуку точки відбору максимальної потужності сонячним модулем. Для ефективного керування мережовим багаторівневим інвертором напруги ці системи враховують такі параметри сонячного модуля: вихідну напругу, струм, рівень сонячної освітленості, температуру навколишнього середовища та самого модуля. Однак такі системи не завжди забезпечують синхронізацію роботи інвертора з мережею та не враховують параметри мережі (напругу, струм).

Вказані проблеми обумовлюють актуальність наукової задачі, спрямованої на підвищення ефективності роботи системи керування мережовим багаторівневим інвертором напруги при роботі з сонячним модулем та мережею.

# Розділ 1

## АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИМИ МЕРЕЖЕВИМИ ІНВЕРТОРАМИ НАПРУГИ

### 1.1 Аналіз систем керування багаторівневими інверторами напруги в системах електропривода

Основним засобом для перетворення постійного струму в змінний у будь-якому електротехнічному комплексі є інвертор напруги. Зокрема широкого використання набули багаторівневі інвертори напруги замість однорівневих [5]–[9]. Однак, перевагами однорівневих інверторів є низька вартість, висока ефективність, стабільна робота, висока надійність та простота конструкції. З іншої сторони, багаторівневі інвертори напруги мають низку переваг над однорівневими [10]–[13]: покращена форма вихідної напруги, покращена електромагнітна сумісність та менші втрати в силовій частині. Але разом з тим також є деякі недоліки таких інверторів, а саме: збільшення кількості силових ключів і, як наслідок, ускладнення реалізації системи керування комутацією [14]–[17].

Одним із способів керування автономним інвертором напруги (АІН) є гістерезисне керування, яке формує на виході інвертора імпульсну напругу із забезпеченням слідкування як за вихідним струмом, так і за вихідною напругою [18].

Класичний варіант побудови системи гістерезисного керування передбачає слідкування за вихідним струмом АІН (рис. 1.1) при активно-індуктивному навантаженні, дозволяючи формувати його синусоїдальну форму. Існує багато підходів побудови алгоритмів гістерезисного керування зі слідкуванням за струмом [19]–[22]. Різноманіття способів передбачає їх порівняльний аналіз за тими чи іншими показниками. Як правило, в публікаціях наводиться їх опис, реалізація, спектри струму та залежності числа комутацій ключів від часу [23]–[25].

При гістерезисному способі керування за струмом з синусоїдального сигналу задання за струмом віднімається гармонічний синусоїдальний сигнал зворотного зв'язку за струмом. В результаті чого отримується сигнал неузгодженості за струмом, близький за формою до пилкоподібного сигналу.

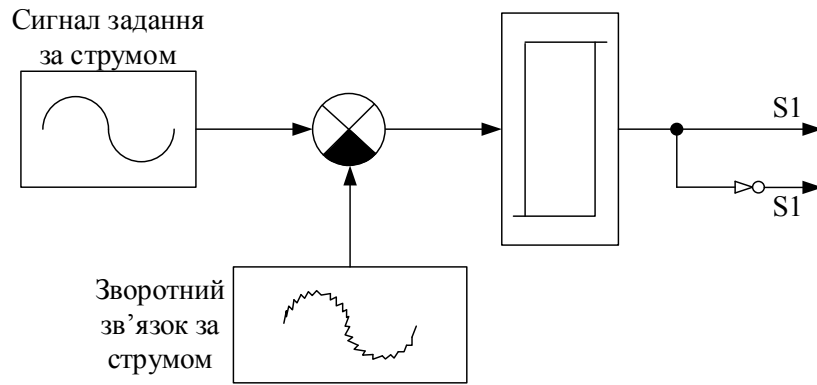


Рисунок 1.1 – Принцип побудови гістерезисного керування за струмом

В гістерезисному керуванні за струмом процес інтегрування сигналу неузгодженості здійснюється за рахунок високої частоти комутації навантаження та інтегруючих властивостей навантаження.

Однак для вирішення таких проблем, як стрибки напруги, що виникають при комутації навантаження, або провали і перенапруги в електричній мережі, краще використовувати гістерезисне керування зі слідкуванням за напругою (рис. 1.2).

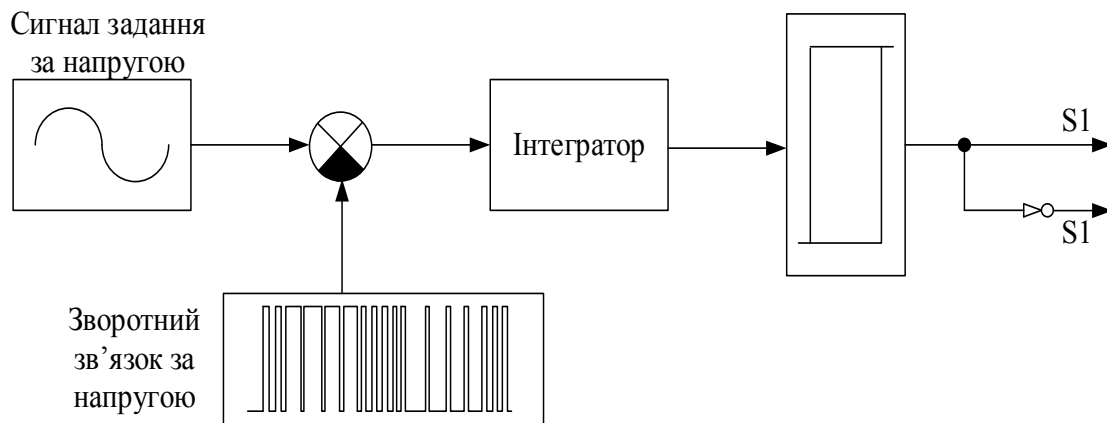


Рисунок 1.2 – Принцип побудови гістерезисного керування за напругою

При гістерезисному способі керування за напругою з синусоїдального сигналу задання за напругою віднімається модульований сигнал зворотного зв'язку за напругою. Одержаний сигнал неузгодженості за напругою надходить на вхід блока інтегрування, в результаті



чого отримується інтегрований сигнал неузгодженості, наближений до пилкоподібного сигналу.

Однак гістерезисний спосіб керування багаторівневим інвертором напруги менш ефективний порівняно із застосуванням системи керування з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

Відомо, що для автономних інверторів напруги з керованими ключами застосовуються різні технології ШІМ, зокрема з «відслідковуванням» (релейного типу), програмна (з вибіркоким зменшенням вищих гармонік), багаторівнева ШІМ, ШІМ комбінована з амплітудно-імпульсною модуляцією [26], а також просторово-векторна ШІМ [27]–[29].

В роботі [30] розглядається багаторівневий інвертор напруги, схема якого показана на рис. 1.3.

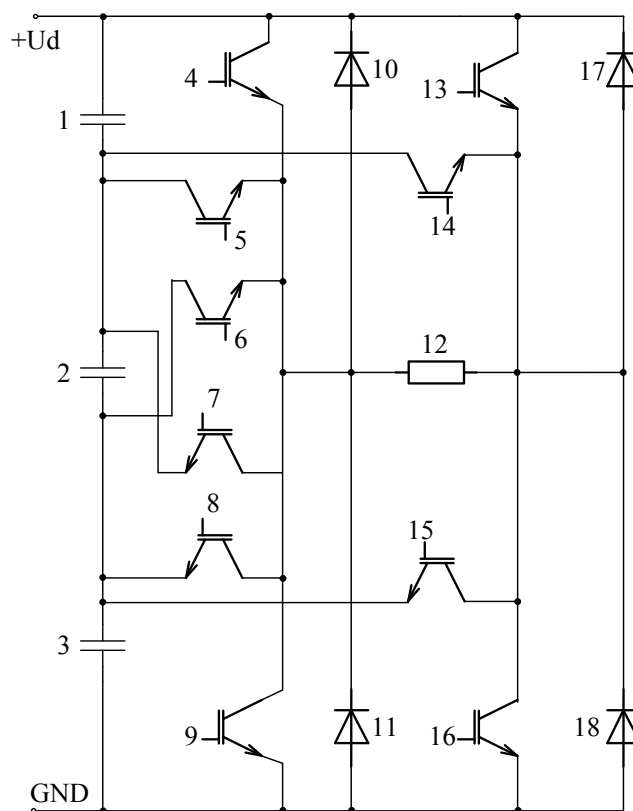


Рисунок 1.3 – Будова багаторівневого інвертора напруги

На рис. 1.3: 1, 2, 3 – ємності, 4–9, 13–16 – транзистори; 12 – резистор; 10, 11, 17, 18 – діоди.

Цей пристрій забезпечує можливість одержання декількох рівнів напруги живлення фазних навантажень за рахунок відкриття відповідного числа керованих ключів у відповідних комбінаціях, крім додаткових діодів. Струм навантаження протікає в контурі лише через відповідну комутаційну пару силових ключів з відповідним рівнем ступенів напруги, що знижує статичні втрати. Керування транзисторами відбувається шляхом ШІМ модуляції. Перевагою використання такого інвертора є те, що за рахунок схемотехнічного рішення зменшуються масогабаритні показники пристрою. Однак головним обмеженням вказаного інвертора є низька ефективність порівняно з такими багаторівневими інверторами напруги, як з фіксуєчими діодами, плаваючими конденсаторами та каскадним з'єднанням Н-мостів [31, 32].

В роботі [33] пропонується спосіб керування ключами модульного багаторівневого інвертора напруги, який передбачає формування вихідної напруги змінної амплітуди та частоти за рахунок зміни тривалості включень базових векторів напруги, що відповідають стійким станам інвертора. При цьому знаходження тривалості включення на кожному періоді модуляції виконується з величини проєкцій заданого вектора напруги на сторони трикутника базових векторів, вершини яких знаходяться на мінімальній відстані від заданого. В сигнали напруги задання інжектуються напруга нульової послідовності, величина якої регулюється відповідно до різниці часткових напруг на конденсаторних батареях модулів перетворювача, а також для обмеження перетоку струмів між плечима інвертора.

Широкого застосування багаторівневі автономні інвертори напруги набули в системах електроприводів [34]–[37]. Зокрема в роботі [34] розглядається система керування багаторівневим інвертором напруги асинхронного електропривода (рис. 1.4).

Перевагою використання такої системи є можливість вимірювання фазних напруг і кутів зсуву фаз двигуна та їх синхронізації з інвертором для ефективного керування двигуном.

В роботі [38] запропонована цифрова система керування автономним інвертором напруги з ШІМ. Структурна схема формувача ШІМ

для керування інвертором та часові діаграми показані відповідно на рис. 1.4 та рис. 1.5.

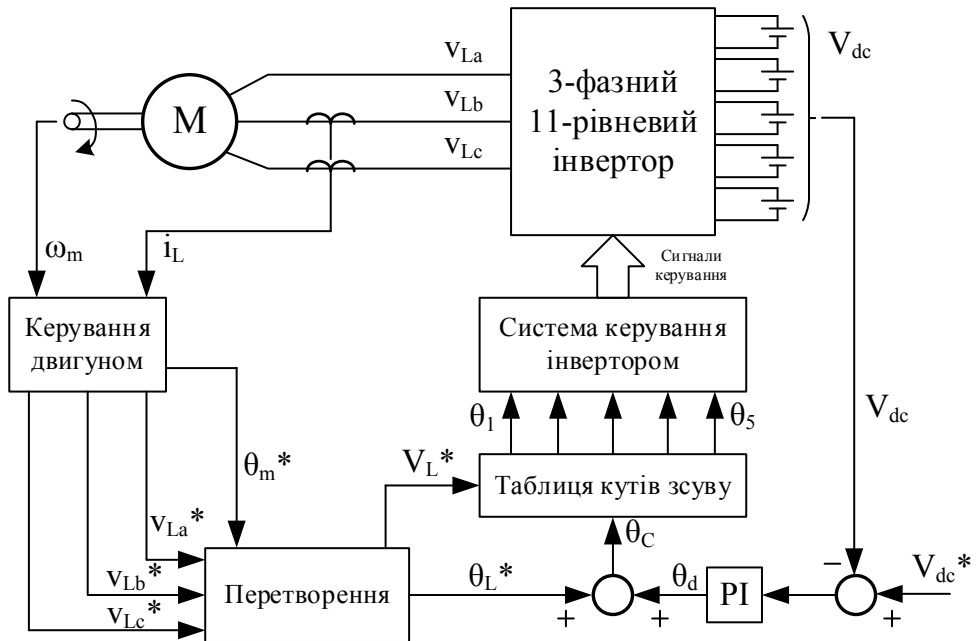


Рисунок 1.4 – Система керування швидкісним асинхронним електроприводом з використанням багаторівневого інвертора напруги

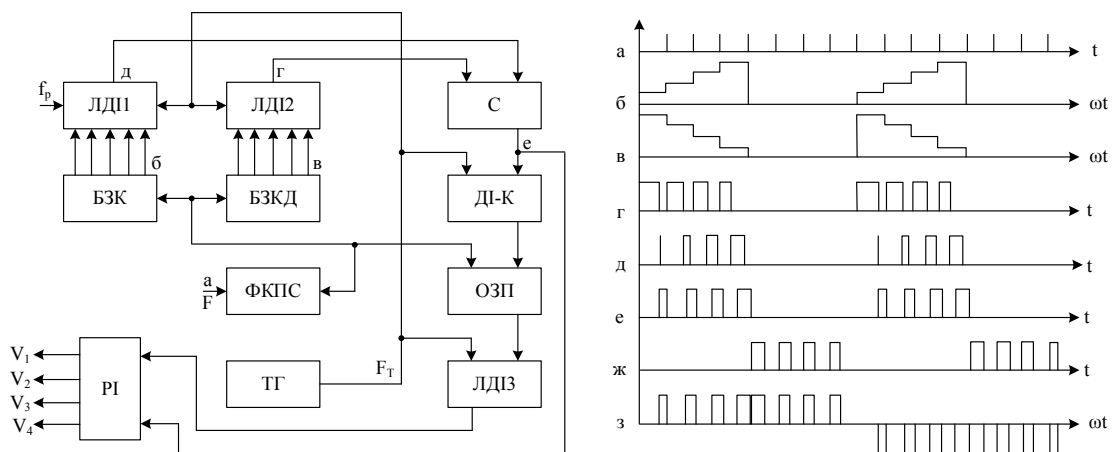


Рисунок 1.5 – Структурна схема формувача ШІМ та часові діаграми

На рис. 1.5: ЛДІ1 – ЛДІ3 – лічильники двійкових імпульсів; БЗК+БЗКД – цифрові блоки задання амплітуд сигналів, які апрокси-

нують синусоїду одиничної амплітуди; ТГ – тактовий кварцовий генератор; ФКПС – формувач коду послідовних станів; ОЗП – оперативний запам’ятовувальний пристрій; ДІ-К – перетворювач тривалості імпульсів в код; С – суматор; РІ – розподілювач імпульсів керування силовими транзисторами.

В розглянутому пристрої точність формування синусоїдної напруги визначається не кількістю функціональних елементів, а об’ємом пам’яті, частотний діапазон – частотними властивостями перемикаючих елементів силового контуру інвертора. Пристрій дозволяє здійснити незалежне керування безпосередньо в кодах амплітудою та частотою вихідної напруги. Форма згенерованого сигналу відповідає багатократній однополярній, симетрично-односторонній ШІМ за синусоїдальним законом.

Відома система з векторним керуванням [39], структурна схема якої наведена на рис. 1.6. Відмінною рисою цієї системи є необхідність використання додаткового обчислювального блока, в якому виконується оцінка поточного кутового положення вектора потокозчеплення ротора. Це можливе на основі розв’язання в реальному часі системи диференціальних рівнянь, складених відповідно до математичної моделі двигуна.

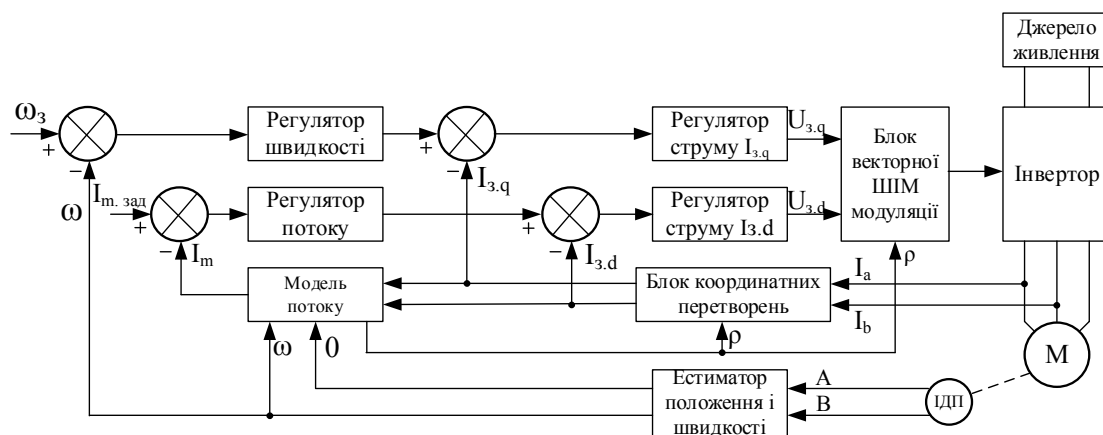


Рисунок 1.6 – Структурна схема системи векторного керування асинхронним двигуном

Для реалізації векторного керування, перш за все, потрібно отримати інформацію про координати відповідного вектора в нерухомій сис-

темі координат, в якій виконується вимірювання, та інформацію про орієнтацію обертової системи координат, в якій виконуються незалежне регулювання електромагнітних і механічних змінних. Далі виконується векторне перетворення. Як первинні вимірювальні перетворювачі слід використовувати вимірювачі струму і положення ротора.

В роботі [40] запропонована структурна схема системи керування інвертором (рис. 1.7) та функціональна схема блока ШІМ (рис. 1.8). Система керування інвертором включає в себе пряме і зворотне перетворення Кларка та синхронізацію з мережею.

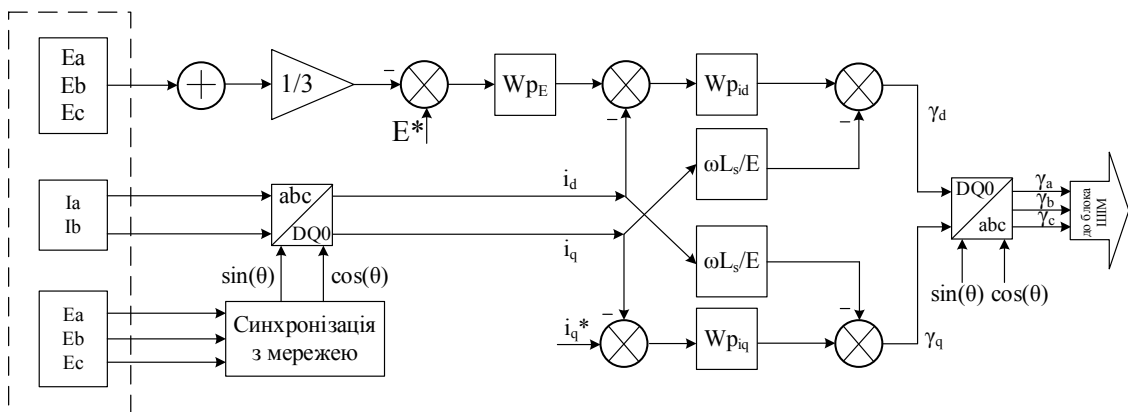


Рисунок 1.7 – Структурна схема системи керування інвертором



Рисунок 1.8 – Функціональна схема блоку ШІМ

Завдяки перетворенню Кларка всі необхідні сигнали реального часу перенесені в «d-q» систему координат. Синхронізація з мережею необхідна для синхронізації «d-q» координат з мережею. Вихідними даними системи є синусна та косинусна функції, які визначають кут положення вектора трифазної напруги, який є базовим для системи керування.

Блок ШІМ визначає включення напівпровідникових ключів та складається з блоків визначення границь і коефіцієнта заповнення, визначення напрямку і полярності, сортування, генератора індексів, таблиці стану ключів та ШІМ.

Відомі математичні моделі багаторівневих інверторів [41, 42], які застосовуються в якості перетворювальних агрегатів регульованих асинхронних електроприводів. Вказані моделі досліджені для двигунного режиму електропривода з традиційною для багаторівневих інверторів векторною системою керування, однак в них відсутній аналіз роботи інверторів в генераторному режимі роботи електропривода, аналіз паралельної роботи на електричну мережу, що підтверджує необхідність проведення досліджень в напрямку розробки систем керування багаторівневими інверторами, орієнтованими на застосування в сонячних електростанціях.

## **1.2 Аналіз систем керування інверторами напруги із застосуванням алгоритму визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем**

Промисловістю виготовляються багаторівневі інвертори напруги, які призначені для роботи з сонячними модулями. Для керування такими інверторами використовуються системи керування із застосуванням алгоритму відслідковування точки відбору максимальної потужності сонячним модулем [43]–[46].

Відслідковування точки відбору максимальної потужності – це спосіб керування, який використовується для отримання можливої максимальної потужності на виході сонячного модуля [44, 45]. Для цього способу використовуються цифрові пристрої, які аналізують вихідну вольт-амперну характеристику сонячного модуля та підбирають оптимальний опір для отримання максимальної потужності за

будь-яких погодних умов [47]. Як правило, системи керування із застосуванням алгоритму відслідковування точки відбору максимальної потужності сонячним модулем розрізняють залежно від алгоритму їх роботи, а саме: контролю за збудженням та спостереженням [47], інкрементний [48], з використанням нечіткої логіки [49], контролю за струмовою розгорткою [50], постійною напругою [51]–[54].

В роботі [55] запропонована система керування багаторівневим інвертором напруги, структурна схема якої показана на рис. 1.9.

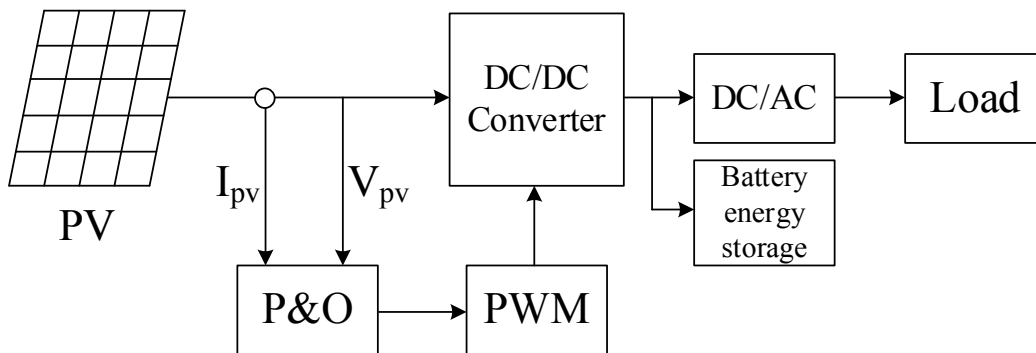


Рисунок 1.9 – Структурна схема системи керування БІН із застосуванням алгоритму відслідковування точки відбору максимальної потужності

На рис. 1.9: PV – сонячний модуль; P&O – пристрій для відслідковування точки відбору максимальної потужності; PWM – система формування керуючих імпульсів; DC/DC Converter – перетворювач постійного струму; DC/AC – багаторівневий інвертор напруги; Battery energy storage – батарея; Load – навантаження.

Дана система має два перетворювачі: DC/DC Converter, який керується системою формування керуючих імпульсів і призначений для підвищення рівня напруги, та DC/AC – багаторівневий інвертор напруги для перетворення енергії для потреб споживача.

Пристрій для відслідковування точки відбору максимальної потужності працює за методом збурення та спостереження. Пристрій змінює на невелику величину значення вхідного опору, внаслідок чого змінюється напруга сонячного модуля і відбувається вимірювання потужності. Якщо потужність збільшується – пристрій продовжує змінювати напругу в тому ж напрямку до тих пір, доки потужність не перестане збільшуватись. Такий метод є поширеним не дивлячись на

те, що він приводить до коливання потужності. Основним недоліком такого методу є те, що він залежить від точності задання алгоритму передбачення та адаптації.

Відома система керування багаторівневим інвертором напруги [56] (рис. 1.10), яка складається з сонячного модуля 1, пристрою визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем 2, підвищувального перетворювача 3, ПІД регулятора підвищувального перетворювача 4, контролера заряду батарей 5, батареї 6, багаторівневого інвертора напруги 7, ПІД регулятора напруги багаторівневого інвертора напруги 8, фільтра 9; навантаження 10.

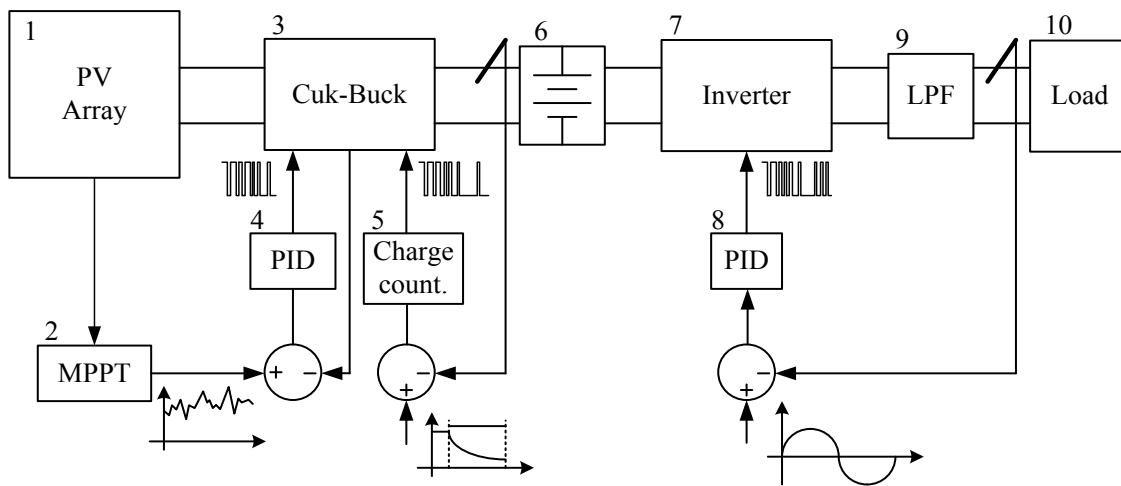


Рисунок 1.10 – Структурна схема системи керування інвертором напруги

Входи підвищувального перетворювача підключені до виходів сонячного модуля, а виходи до батареї. Виходи батареї підключені до інвертора напруги. Керування підвищувальним перетворювачем здійснюється за допомогою двох керуючих сигналів: один сигнал надходить з пристрою визначення точки відбору максимальної потужності, а інший – з виходу контролера заряду батарей. Керування інвертором здійснюється за допомогою ПІД регулятора.

Пристрій визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем може керувати системою з врахуванням стану заряду батарей, навантаження і доступної потужності. Перший можливий спосіб керування застосовується тоді, коли вироблена потуж-



ність сонячним модулем менша, ніж потужність навантаження. Другий спосіб керування застосовується тоді, коли доступна потужність більша, ніж потужність навантаження, за рахунок чого відбувається заряджання батарей. При перших двох способах керування струм батарей не може досягнути свого номінального значення, але сигнал, який генерується ПД регулятором заряджання батарей генерує, нульовий сигнал помилки. Такий сигнал необхідний для початку заряджання батарей, а визначення точки відбору максимальної потужності здійснюється за допомогою першого ПД регулятора підвищувального перетворювача. Третій спосіб керування передбачає, що вироблена потужність сонячним модулем більша, ніж потужність, накопичена в батареях разом із потужністю навантаження. В цьому випадку струм батарей досягне номінального значення і, як наслідок, сонячний модуль буде зміщувати опорну напругу на вищий рівень напруги пристрою визначення точки відбору максимальної потужності. Тому потужність, згенерована сонячним модулем, буде балансувати між значеннями потужностей заряджених батарей та навантаження. Але практично розглянутий випадок керування системою неможливий, оскільки потужність сонячного модуля повинна бути рівною потужності батарей та навантаження. Четвертий спосіб керування можливий тоді, коли напруга батарей нижча, ніж напруга, яка необхідна для живлення навантаження та потужності, яка виробляється сонячним модулем, недостатня для живлення навантаження. В цьому випадку відбувається просто відключення системи від навантаження та включення батарей для заряджання.

Основним недоліком такої системи керування є те, що вона призначена для автономної системи електропостачання, а також те, що система керування складається з підвищувального перетворювача та інвертора напруги, а це ускладнює процес керування та збільшує втрати в цих пристроях.

Існують системи керування, в яких застосовується апарат нечіткої логіки [57, 58]. Зокрема система, яка описана в [57] (рис. 1.11) відрізняється від попередньої тим, що використовується нечіткий регулятор, а також тим, що в ній відсутні батареї.

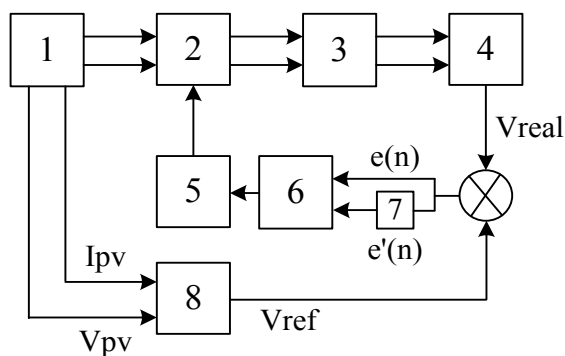


Рисунок 1.11 – Структурна схема системи керування перетворювачем напруги

На рис. 1.11: 1 – сонячний модуль; 2 – DC/DC перетворювач напруги; 3 – інвертор напруги; 4 – навантаження; 5 – система формування сигналів ШІМ; 6 – нечіткий регулятор; 7 – блок диференціювання; 8 – блок визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем.

В системі відбувається керування DC/DC перетворювачем напруги за допомогою нечіткого регулятора, який враховує параметри блока визначення точки відбору максимальної потужності, а також навантаження, та формує на своєму виході керуючі сигнали, які надходять на вхід системи формування сигналів ШІМ. Перетворена напруга (підвищена чи понижена) з виходу DC/DC перетворювача напруги надходить на вхід інвертора напруги, який уже інвертує напругу для забезпечення живлення локального навантаження.

Превагою використання нечіткого регулятора є те, що він дозволяє оперувати вхідними даними, заданими нечітко, наприклад, зміна струму й напруги на виході сонячного модуля при різному значенні освітленості. Також є можливість здійснити якісну оцінку вихідних результатів.

Превагою цієї системи керування є те, що вона враховує параметри навантаження та значення максимальної потужності, яку може видати сонячний модуль. Використання нечіткого регулятора дозволяє спростити налаштування системи керування. Але основним недоліком системи керування є те, що керування здійснюється DC/DC перетворювачем напруги, а не напряму інвертором напруги.

Результати роботи [59] орієнтовані на впровадження системи керування інвертором на рівні сонячної електростанції і загалом узго-

дження балансів активної та реактивної потужностей, що актуально для розподільчих електромереж. На практиці не використовується для низьковольтних мереж 0,4 кВ, які наближені до споживача. Тому така система потребує адаптації до вимог більш актуальних для споживача, а саме підтримання необхідних графіків напруги та частоти, тобто параметрів якості електроенергії.

Всі системи, описані в цьому підрозділі, об'єднує те, що в них застосовується метод визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем, однак він використовується лише для автономних систем. А тому цей метод можна використати для керування мережевими багаторівневими інверторами напруги фотоелектричних систем.

### **1.3 Аналіз систем керування мережевими багаторівневими інверторами напруги фотоелектричних установок**

Для перетворення енергії постійного струму, виробленої фотоелектричною установкою, в напругу змінного струму використовуються мережеві багаторівневі інвертори напруги [59]–[62]. Залежно від конфігурації фотоелектричної установки, інвертори можуть класифікуватись таким чином:

- інтегровані модуль-інвертори – використовуються для дуже малих фотоелектричних установок (може використовуватись тільки одна сонячна панель) в діапазоні до 0,4 кВт [63]–[65];
- лінійні інвертори (використовуються для малих установок в діапазоні 0,4–2 кВт [66]);
- багатолінійні інвертори (використовуються для середніх та великих установок з панелями, з'єднаними в один чи два ряди в діапазоні 1,5–6 кВт [67]);
- міні-центральні інвертори (використовуються для невеликих електростанцій з трифазною топологією або модульною конструкцією в діапазоні більше 6 кВт [68]);
- для великих установок та невеликих електростанцій в діапазоні від 100 кВт [69];
- центральні інвертори в діапазоні 100–1000 кВт [70];
- інвертори для великих електростанцій в діапазоні, починаючи від десятків МВт.

Порівняно з автономними інверторами та інверторами, які застосовуються в системах електропривода, мережеві багаторівневі інвертори напруги мають більш складну конструкцію та функціональність.

В роботі [71] запропоновано систему керування мережевим багаторівневим інвертором напруги (МБІН) (рис. 1.12) за струмом, яка дозволяє синхронізувати роботу інвертора з мережею.

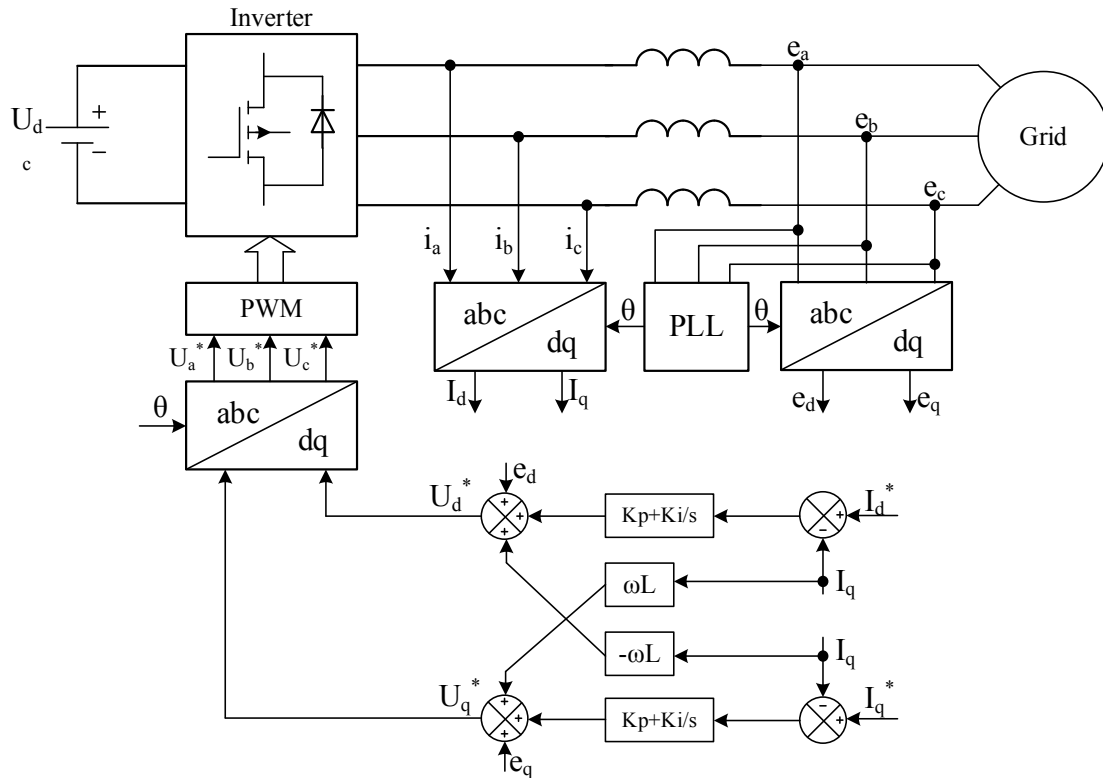


Рисунок 1.12 – Система керування МБІН за струмом

Система керування складається з блока перетворення трифазної системи координат abc в ортогональну dq, блока широтно-імпульсної модуляції та двох регуляторів струму по d та q координатах відповідно, а також блока синхронізації з мережею. В системі використовується керування за струмом, оскільки регулятори струму менш чутливі до фазових зсувів напруги мережі та до зміни напруги в мережі. Вихідну потужність та коефіцієнт потужності можна регулювати змінюючи d та q складові струму відповідно. Блок ШІМ виконує

## ЛІТЕРАТУРА

1. G. Masson Orlandi and M. Rekinge, “Global Market Outlook For Photovoltaics 2014-2018S”, *European Photovoltaic Industry Association. Brussels, Belgium*, p. 57, 2014.
2. K. A. Corzine, “Operation and design of multilevel inverters”, *University of Missouri: Rolla*, p. 79, 2005.
3. А. В. Волков і Ю. С. Скалько, «Высоковольтный асинхронный электропривод с трехуровневым автономным инвертором напряжения,» *Вісник КДПУ ім. Михайла Остроградського*, № 4 (51), ч. 1. с. 14–17, 2008.
4. A. Gupta and P. Garg, “Grid integrated solar photovoltaic system using multi level inverter”, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. – 2013. – V. 2.
5. М. В. Гельман, М. М. Дудкин, и К. А. Преображенский, *Преобразовательная техника*. Челябинск: ЮУрГУ, 2009.
6. М. А. Таранов, и П. Т. Корчагин «Многоуровневые и каскадные инверторы,» *Вестник аграрной науки Дона*. № 1, с. 63–66, 2013.
7. А. М. Литвиненко, и И. А. Неляпин «Система управления многоуровневым преобразователем автономного электроснабжения,» *Электротехнические комплексы и системы управления*, № 3, с. 25–27, 2015.
8. Т. В. Анисимова, и А. Н. Данилина «Инверторы с многозонной модуляцией,» *Электронный журнал «Труды МАИ»*. – 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29546>.
9. M. N. Kokate, P. V. Kapoor “Comparison of simulation results three level and five level H-bridge inverter and hardware implementation of single leg H-bridge three level inverter”, *International journal of innovate research & studies*, no. 2(4), pp. 388–403, 2013.
10. В. Филатов «Двух- и трехуровневые инверторы на IGBT. Перспективы решения,» *Силовая электроника*, № 4, с. 38–41, 2012.
11. А. В. Левченко «Трехфазный пятиуровневый широтно-импульсный преобразователь напряжения на основе трехуровневого инвертора,» *Электричество*, № 4, с. 34–39, 2012.
12. К. Е. Михеев, и В. С. Томасов «Анализ энергетических показателей многоуровневых полупроводниковых преобразователей сис-

тем електропривода,» *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*, № 1(77), с. 48–54, 2012.

13. D. Balakrishnan, D. Shanmugam, and K. Indiradevi “Modified Multilevel Inverter Topology for Grid Connected Pv Systems,” *American Journal of Engineering Research (AJER)*, no. 2, pp. 378–384, 2013.

14. N. Adhikari, B. Singh, and A. L. Vyas “Design and Control of Small Power Standalone Solar PV Energy System,” *Asian Power Electronics Journal*, no. 1, 2012.

15. A. Teke, M. B. Latran “Review of Multifunctional Inverter Topologies and Control Schemes Used in Distributed Generation Systems,” *Journal of Power Electronics*, no. 2, pp. 324–340, 2014.

16. J. Kumari, C. S. Babu, D. Lenine, and J. Lakshman “Improvement of static performance of multilevel inverter for single-phase grid connected photovoltaic modules,” in *Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET), 2009 2nd International Conference*, pp. 691–697, 2009.

17. S. Saridakis, E. Koutroulis, and F. Blaabjerg “Optimal Design of Modern Transformerless PV Inverter Topologies,” *IEEE transactions on energy conversion*, no. 2, pp. 394–404, 2013.

18. Н. М. Колмаков, И. А. Баховцев, и А. Г. Гарганеев «Анализ гистерезисного управления по напряжению автономного инвертора напряжения,» *Доклады ТУСУРа*, № 2, с. 84–89, 2016.

19. L. Chang, H. M. Kojabadi “Review of interconnection standards for distributed power generation,” in *Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, LESCOPE*, pp. 36–40, 2002.

20. R. Davoodnezhad, D. G. Holmes, and B. P. McGrath “Novel Three-Level Hysteresis Current Regulation Strategy for Three Phase Three-Level Inverters,” *IEEE Trans. on Power Electron*, vol. 29, no. 11, pp. 6100–6109, 2013.

21. A. Shukla, A. Ghosh, and A. Joshi “Hysteresis Modulation of Multilevel Inverters,” *IEEE Trans. on Power Electron*, vol. 26, no. 5, pp. 1396–1409, 2011.

22. R. Gupta, A. Ghosh, and A. Joshi “Multiband Hysteresis Modulation and Switching Characterization for Sliding-Mode-Controlled Cascaded Multilevel Inverter,” *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 57, no. 7, pp. 2344–2353, 2010.

23. H. Mao, X. Yang, Z. Chen, and Z. Wang, “Hysteresis Current Controller for Single-Phase Three-Level Voltage Source Inverters”, *IEEE Trans. on Power Electron*, vol. 27, no. 7., pp. 3330–3339, 2012.

24. S. Poulsen, and M.A.E Andersen, “Hysteresis controller with constant switching frequency”, *IEEE Trans. Consum. Electron*, vol. 51, pp. 688–693, 2005.

25. M. Mohseni, and S. M. Islam, “New Vector-Based Hysteresis Current Control Scheme for Three-Phase PWM Voltage-Source Inverters”, *IEEE Trans. on Power El*, vol. 25, no. 9, pp. 2299–2309, 2010.

26. Т. О. Терещенко, В. О. Беженар, та М. Ю. Білошицький, «Багаторівневий інвертор напруги з амплітудною широтно-імпульсною модуляцією», *Технічна електродинаміка*, № 4, с. 81–83, 2014.

27. И. А. Баховцев, «Анализ выходного напряжения многофазных четырехуровневых инвертором напряжения с ШИМ», *Доклады ТУ-СУРа*, № 3 (33), с. 175–180, 2014.

28. Е. Е. Чаплыгин, *Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией: Учебное пособие по курсу «Моделирование электронных устройств и систем»*, Москва: Изд-во МЭИ, 2009.

29. Р. Т. Шрейнер, *Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты*. Екатеринбург: УрОРАН, 2000.

30. А. В. Переверзев, і Д. О. Кузнецов, “Багаторівневий інвертор напруги”, *Патент України*, H02M7/505, № 200606585, 15.11.2006.

31. J. Rodriguez, J. S. Lai, F. Z. Peng “Multilevel Inverters: Survey of Topologies, Controls, and Applications”, *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 49, № 4, pp. 724–728. 2002.

32. M.-Ali Rezaei, H. Iman-Eini, and Sh. Farhangi, “Grid-Connected Photovoltaic System Based on a Cascaded H-Bridge Inverter”, *Journal of Power Electronics*, vol. 12, no. 4, 2012.

33. О. М. Сінчук, Ю. Г. Осадчук, І. А. Козакевич та І. Ю. Лісютенко “Спосіб керування модульним багаторівневим інвертором напруги”, *Патент України*, H02M7/00, № u201407560, 25.12.2014.

34. L. M. Tolbert, F. Z. Peng, D. J. Adams, and J. W. McKeever, “Multilevel inverters for large automotive electric drives,” in *Combat venicie second international conference*, no. 2, pp. 209–214, 1997.

35. L. Haiwen, L. M. Tolbert, B. Ozpinecci, and Z. Du, “Hybrid multilevel inverter with single DC source,” *Circuits and Systems MWSCAS*, pp. 538–541, 2008.
36. L. M. Tolbert, F. Z. Peng, “Multilevel converters for large electric drives,” *APEC’98*, pp. 530–536, 1998.
37. Ю. Н. Чередник, А. С. Пащенко, Е. А. Ревякин и В. О. Квашнин, «Частотно-регулируемый асинхронный электропривод, управляемый от автономного инвертора напряжения,» *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, № 4 (29), с. 86–93, 2012.
38. О. И. Григорьев, А. С. Какурин и А. А. Фёдоров “Цифровая система управления автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией”, *Журнал "Труды Псковского политехнического института*, № 13, с. 284–287, 2010.
39. Б. Т. Кононов, А. О. Нечаус, та Н. М. Рябуха, «Система керування частотно-регульованим електроприводом на базі асинхронного електричного двигуна,» *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*, № 3 (40), с. 136–140. 2014.
40. Б. Ю. Алтунин, и И. А. Карнавский, «Математическая модель компенсатора неактивной мощности на базе многоуровневого инвертора с зонной шим на высокой частоте,» *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. Электротехника и электроэнергетика*, № 4 (83), с. 219–225, 2010.
41. Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай, и И. Г. Титаренко «Моделирование электропривода переменного тока с каскадным многоуровневым инвертором напряжения,» *Электротехника и Электромеханика*, № 2, с. 40–47, 2013.
42. Н. В. Донской, А. Иванов, В. Матисон и И. Ушаков «Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики,» *Силовая электроника*, № 1, с. 43–46, 2008.
43. Р. Хегази, и В. И. Виссарионов, «Моделирование системы слежения за максимумом мощности фотоэлектрической панели,» *ЭЛЕКТРИЧЕСТВО*, № 2, с. 50–53, 2012.
44. A. Raju, and S. Arun, “Hybrid multilevel inverter topology with an independent control for photovoltaic system,” *International journal of advanced research in electrical, electronics and instrumentation engineering*, no. 2, pp. 278–287, 2013.



45. R. S. P. Lakshman, C. P. Kurian, B. K. Singh, and A. V. Jyothi, "Simulation and control of dc/dc converter for mppt based hybrid pv/wind power system," *International journal of renewable energy research*, no. 3, pp. 801–809, 2014.
46. N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," *IEEE transactions on power electronics*, no. 4, pp. 963–973, 2005.
47. L. Piegari, R. Rizzo, I. Spina, and P. Tricoli, "Optimized adaptive perturb and observe maximum power point tracking control for photovoltaic generation," *Energies*, no. 8, pp. 3418–3436, 2015.
48. A. Ahmad, R. Loganathan, "Real-time implementation of solar inverter with novel mppt control algorithm for residential applications," *Energy and Power Engineering*, no. 5, pp. 427–435, 2013.
49. C. I. Vinoth "Advanced SEPIC Converter with Fuzzy Logic Controller Based MPPT for Standalone System," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 4, 2015.
50. K. Arulkumar, K. Palanisamy, and D. Vijayakumar, "Recent Advances and Control Techniques in Grid Connected Pv System – A Review," *International journal of renewable energy research*, no. 3, 2016.
51. N. S. Jayalakshmi, D. N. Gaonkar, and P. B. Nempu, "Power Control of PV/Fuel Cell/Supercapacitor Hybrid System for Stand-Alone Applications," *International journal of renewable energy research*, no. 2, pp. 673–679, 2016.
52. E. M. Natsheh, A. Albarbar, "Photovoltaic Model with MPP Tracker for Standalone/Grid Connected Applications," in *IET Conference on Renewable Power Generation (RPG)*, 2011.
53. W. Christopher, R. Ramesh, "Comparative Study of P&O and InC MPPT Algorithms," *American Journal of Engineering Research (AJER)*, no. 12, pp. 402–408, 2002.
54. N. S. Jayalakshmi, and D. N. Gaonkar, "Modeling and Performance Analysis of Grid Integrated Hybrid Wind and PV Based DG System with MPPT Controllers," *International Journal of Distributed Energy Resources and Smart Grids, Technology and Science Publishers, Germany*, no. 10(2), pp. 115–131, 2014.
55. G. Ganesh, G.V. Kumar, A. R. V. Babu, G. S. Rao, and Y. R. Tagore, "Performance analysis and mppt control of a standalone

hybrid power generation system,” *Journal of Electrical Engineering*, no. 15, pp. 334–344, 2015.

56. A. H. El Khateb, A. R. Nasrudin, and J. Selvaraj, “Ćuk-Buck Converter for Standalone Photovoltaic System,” *Journal of Clean Energy Technologies*, no. 1, pp. 69–74, 2013.

57. C. I. Vinoth, C. Kathirvel, “Advanced sepic converter with fuzzy logic controller based mppt for standalone system,” *International journal of advanced research in electrical, electronics and instrumentation engineering*, vol. 4, pp. 1673–1678, 2015.

58. С. А. Іванець, О. В. Красножон, «Використання нечіткої логіки в системах відстеження точки максимальної потужності фотоелектричних перетворювачів,» *Вісник Чернігівського державного технологічного університету: Серія: Технічні науки*. Чернігів: ЧНТУ, № 2 (73). с. 180–187, 2014.

59. S. Pandey, D. Sharma, “Multilevel inverter topologies or photovoltaic grid connections: a review”, *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, vol. 3, pp. 93–95, 2015.

60. Г. П. Охоткин, А. Г. Серебrenиков, «Основные принципы построения автономных солнечных электростанций,» *Современные проблемы науки и образования*. № 6, 2012. [Електронний ресурс]. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/106-7345>.

61. S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, and F. Blaabjerg, “Power inverter topologies for photovoltaic modules – a review,” in *Conference Record – IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, vol. 2, pp. 782–788, 2002.

62. F. Schimpf, L. E. Norum, “Grid connected Converters for Photovoltaic, State of the Art, Ideas for Improvement of Transformerless Inverters”, *Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics*, 2008. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/27516824\\_Grid\\_Connected\\_Converters\\_for\\_Photovoltaic\\_State\\_of\\_the\\_Art\\_Ideas\\_for\\_Improvement\\_of\\_Transformerless\\_Inverters](https://www.researchgate.net/publication/27516824_Grid_Connected_Converters_for_Photovoltaic_State_of_the_Art_Ideas_for_Improvement_of_Transformerless_Inverters)

63. M. Islam, S. Mekhilef, and M. Hasan, “Single phase transformerless inverter topologies for grid-tied photovoltaic system: A review”, *Renewable and sustainable energy reviews*, no. 45, pp. 69–86, 2015.

64. J. M. A. Myrzik, M. Calais, “String and module integrated inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems – a review,” in

*IEEE Bologna PowerTech Conference*, 2003. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/4078195\\_String\\_and\\_module\\_integrated\\_inverters\\_for\\_single-phase\\_grid\\_connected\\_photovoltaic\\_systems\\_-\\_a\\_review](https://www.researchgate.net/publication/4078195_String_and_module_integrated_inverters_for_single-phase_grid_connected_photovoltaic_systems_-_a_review).

65. M. Birane, Ch. Larbes, and A. Cheknane, “Energy efficiency improvement of photovoltaic systems with different configurations of PV-inverter topology for renewable energy systems,” *Proceedings of Engineering & Technology (PET)*, no. 3, pp. 802–809, 2016.

66. Z. Özkan, and A. M. Hava, “Classification of grid connected transformerless PV inverters with a focus on the leakage current characteristics and extension of topology families,” *Journal of Power Electronics*, no. 1, pp. 256–267, 2015.

67. A. Raju, S. Arun, “Hybrid multilevel inverter topology with an independent control for photovoltaic system,” *International journal of advanced research in electrical, electronics and instrumentation engineering*, vol. 2, pp. 278–287, 2013.

68. M. I. Desconzi, R. C. Beltrame, C. Rech, L. Schuch, and H. L. Hey, “Photovoltaic stand-alone power generation system with multilevel inverter,” in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11)*, no. 9, pp. 866–871, 2011.

69. C. Govindaraju, and K. Baskaran, “Cascaded multilevel photovoltaic inverter topology with hybrid phase disposition modulation for grid connected PV system,” *Journal of Electrical Engineering*, no. 1, pp. 141–149, 2010.

70. M. Alahmad, M. A. Chaaban, and S. K. Lau, “An adaptive photovoltaic-inverter topology,” *Architectural Engineering – Faculty Publications*, 2011, [Online]. Available: [http://digitalcommons.unl.edu/archengfacpub/47?utm\\_source=digitalcommons.unl.edu%2Farchengfacpub%2F47&utm\\_medium=PDF&utm\\_campaign=PDFCoverPages](http://digitalcommons.unl.edu/archengfacpub/47?utm_source=digitalcommons.unl.edu%2Farchengfacpub%2F47&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages).

71. A. Abdalrahman, A. Zekry, and A. Alshazly, “Simulation and implementation of grid-connected inverters,” *International journal of computer applications*, no. 4, pp. 41–49, 2013.

72. T. Hornik, Q. –C. Zhong, “A current-control strategy for voltage-source inverters in microgrids based on  $H^\infty$  and repetitive control,” *IEEE transactions on power electronics*, no. 3, pp. 943–952, 2011.

73. S. Mujawa, G. M. Karve, “Control of grid connected inverter system for sinusoidal current injection with improved performance,”

*International journal of innovations in engineering research and technology*, vol. 1, 2014. [Online]. Available: [http://www.ijert.org/admin/papers/1419061802\\_Volume%201%20Issue%202.pdf](http://www.ijert.org/admin/papers/1419061802_Volume%201%20Issue%202.pdf).

74. S. Sezen, A. Aktas, M. Ucar, and E. Ozdemir, “A three-phase three-level npc inverter based grid-connected photovoltaic system with active power filtering,” *International power electronics and motion control conference and exposition*, no. 16, pp. 1572–1576, 2014.

75. С. М. Левицький «Система керування багаторівневим інвертором сонячної електричної станції,» *Електротехніка і Електромеханіка*, № 5, с. 26–29, 2015.

76. В. С. Бомбик «Аналітична модель MPPT-функції системи керування інвертором напруги сонячної електростанції,» у *Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету (технічні науки)*, № 2, с. 34–46, 2016.

77. M. Yue, X. Wang “A Revised Incremental Conductance MPPT Algorithm for Solar PV Generation Systems”, *Sustainable Energy Technologies Department Brookhaven National Laboratory Upton*, 2015.

78. FR-A700 Преобразователь частоты. Руководство по эксплуатации, с. 246–249, 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://mitsubishi.drives-ua.com/pdf/fr-a700-operating-instructions.pdf>.

79. А. А. Усольцев *Частотное управление асинхронными двигателями: Учебное пособие*. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006.

80. С. М. Левицький, В. С. Бомбик «Система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги,» *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, № 1 (33), с. 75–81, 2016.

81. Н. А. Полковникова, *Научные и инженерные расчёты в среде Matlab: учебное пособие*. М.: МОРКНИГА, 2019.

82. И. В. Черных, *Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. 1-е издание*, 2007, 288 с.

83. S. E. Babaa, M. Armstrong, V. Pickert, “Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems,” *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 2, pp. 59–72, 2014.

84. V. Salas, E. Olias, A. Barrado, and A. Lazaro, “Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-Alone Photovoltaic Systems,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, pp. 1555–1578, 2012.

85. H. N. Zainudin, S. Mekhilef, “Comparison study of maximum power point tracker techniques for PV systems,” in *Proceedings of the 14 th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10)*, pp. 750–755, 2010.

86. G. M. S. Azevedo, M. C. Cavalcanti, K. C. Oliveira, and F. A. S. Neves, Z. D. Lins “Evaluation of maximum power point tracking methods for grid connected photovoltaic systems,” in *IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1456–1462, 2008. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/224323740\\_Evaluation\\_of\\_Maximum\\_Power\\_Point\\_Tracking\\_Methods\\_for\\_Grid\\_Connected\\_Photovoltaic\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/224323740_Evaluation_of_Maximum_Power_Point_Tracking_Methods_for_Grid_Connected_Photovoltaic_Systems).

87. K. S. Tey, S. Mekhilef “Modified incremental conductance MPPT algorithm to mitigate inaccurate responses under fast-changing solar irradiation level,” *Solar Energy*, pp. 333–342, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.003>.

88. S. Gomathy, S. Saravanan, S. Thangavel “Design and implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm for a standalone PV system,” *Elixir Electrical Engineering*, pp. 11110–11114, 2012. [Online]. Available: <http://www.elixirpublishers.com>

89. K. K. Kumar, R. Bhaskar, H. Koti, “Implementation of MPPT algorithm for solar photovoltaic cell by comparing short-circuit method and incremental conductance method,” in *The 7<sup>th</sup> International Conference Interdisciplinarity in Engineering. Procedia Technology*, №. 12, pp. 705–715, 2014.

90. V. Grabko, S. Levitskiy, V. Bombyk, W. Wojcik, O. Hotra, and B. Imanbek, “Mathematical control system of grid-tied multilevel voltage inverter,” *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 3, pp. 133–139, 2017.

91. В. С. Бомбик, «Система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги з обмеженням намагнічувального струму трансформатора,» *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, № 3, с. 61–69, 2017.

92. В. В. Грабко, С. М. Левицький, та В. С. Бомбик, «Система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги сонячного модуля,» на *Міжнародній науково-технічній конференції «Екологічна безпека та відновлювальні джерела енергії», м. Вінниця*, с. 41–45, 2017.

93. М. Г. Попович, і О. В. Ковальчук, *Теорія автоматичного керування: Підручник*, 2-ге вид., перероб. і доп. К.: Либідь, 2007.
94. В. А. Бесекерский, и У. П. Попов, *Теория систем автоматического управления*. СПб: Профессия, 2004.
95. В. П. Дьяконов, *Simulink 4. Специальный справочник*. СПб.: Питер, 2002.
96. В. В. Грабко, С. М. Левицький, та В. С. Бомбик, «Комп'ютерна модель системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги,» *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 230–237, 2016.
97. В. С. Бомбик «Комп'ютерне моделювання системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги,» *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/478/477>.
98. Й. Й. Білинський, К. В. Огороднік, і М. Й. Юкиш, *Електронні системи: навчальний посібник*. Вінниця: ВНТУ, 2011.
99. П. П. Рожков, і С. Е. Рожкова, *Конспект лекцій з дисципліни «Мікропроцесорна техніка»*. Харків: ХНАМГ, 2008.
100. В. І. Жабін, І. А. Жуков, В. В. Ткаченко та І. А. Клименко, *Мікропроцесорні системи: навчальний посібник*. Київ: НАУ, 2009.
101. І. В. Чумаченко, М. Д. Кошовий, і В. В. Лопатин *Мікроконтролерні прилади: структура і використання: Навчальний посібник*. Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «ХАІ», 2001.
102. R. Faraji, A. Rouholamini, H. R. Naji, R. Fadaeinedjad, and M. Chavoshian, “FPGA-based real time incremental conductance maximum power point tracking controller for photovoltaic systems,” *The Institution of Engineering and Technology*, vol. 7, pp. 1294–1304, 2014.
103. A. Dolara, R. Faranda, and S. Leva, “Energy Comparison of Seven MPPT Techniques for PV Systems,” *J. Electromagnetic Analysis & Applications*, no. 3, pp. 152–162, 2009.
104. D. C. Huynh “An Improved Incremental Conductance Maximum Power Point Tracking Algorithm for Solar Photovoltaic Panels,” *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 3, pp. 342–347, 2014.

105. M. A. A. M. Zainuri, M. A. M. Radzi, A. C. Soh [and others] “Fundamental Active Current Adaptive Linear Neural Networks for Photovoltaic Shunt Active Power Filters,” *Energies*, no. 9. p. 397, 2016.
106. R. Faranda, S. Leva “Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems,” *WSEAS Trans. Power Syst*, no. 3, pp. 446–455, 2008.
107. S. Mikkili, A. K. Panda “Types-1 and-2 fuzzy logic controllers-based shunt active filter  $I_d$  - $I_q$  control strategy with different fuzzy membership functions for power quality improvement using RTDS hardware,” *IET Power Electron*, no. 6, pp. 818–833, 2013.
108. V. Oleschuk, and A. Sizov, “Synchronous pwm control of symmetrical dual threephase drive in the overmodulation zone,” *Problemele energeticii regionale. Electroenergetică*, no. 1(21), pp. 19–27, 2013.
109. С. М. Левицький, і В. С. Бомбик, «Мікропроцесорний пристрій системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги,» *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 3, с. 70–76, 2016.
110. В. С. Бомбик «Мікропроцесорний пристрій системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги з урахуванням обмеження струму намагнічування трансформатора,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 108–114, 2017.

*Наукове видання*

**Левицький Сергій Михайлович  
Бомбик Вадим Сергійович**

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ  
МЕРЕЖЕВИМ БАГАТОРІВНЕВИМ  
ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено В. Бомбиком

Підписано до друку 7.02.2020 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 4,85.  
Наклад 75 пр. Зам № В2020-03

Вінницький національний технічний університет,  
ІРВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.  
**press.vntu.edu.ua**; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.  
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.