

Вінницький національний технічний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**БОМБИК ВАДИМ СЕРГІЙОВИЧ**

**УДК 621.314.572(043.3)**

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВИМ БАГАТОРІВНЕВИМ**  
**ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ**

спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи  
технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

В. С. Бомбик

Науковий керівник

**Гرابко Володимир Віталійович**  
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2018

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ	
КЕРУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИМИ МЕРЕЖЕВИМИ ІНВЕРТОРАМИ	
НАПРУГИ.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.1 Аналіз систем керування багаторівневими інверторами напруги в системах електропривода .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.2 Аналіз систем керування інверторами напруги із застосуванням алгоритму визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем ....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.3 Аналіз систем керування мережевими багаторівневими інверторами напруги фотоелектричних установок	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.4 Узагальнення результатів аналізу і постановка задачі дослідження .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ	
БАГАТОРІВНЕВИМИ МЕРЕЖЕВИМИ ІНВЕРТОРАМИ НАПРУГИ	
2.1 Математична модель системи керування з врахуванням напруги, частоти та активної потужності електричної мережі	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.2 Математична модель системи керування з врахуванням параметрів напруги, частоти електричної мережі, активної потужності та температури сонячного модуля .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.2.1 Аналітична модель функції визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.2.2 Вплив температури сонячної панелі на її вихідну потужність.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

2.3 Математична модель системи керування мережевого багаторівневого інвертора напруги з обмеженням намагнічувального струму.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.4 Висновки по розділу.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВИМ БАГАТОРІВНЕВИМ ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ</b>	
3.1 Комп'ютерне моделювання системи з врахуванням напруги, частоти та активної потужності електричної мережі	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.2 Комп'ютерне моделювання системи керування з врахуванням напруги, частоти, активної потужності електричної мережі та температури сонячного модуля .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.3 Висновки по розділу.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>РОЗДІЛ 4 МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВИМ БАГАТОРІВНЕВИМ ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ</b>	
4.1 Мікропроцесорний пристрій системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.1.1 Алгоритм визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.1.2 Алгоритм формування сигналів для системи комутації	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.2 Оцінка похибок помилок першого і другого роду при визначенні температури сонячного модуля.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.3 Висновки по розділу.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>11</b>
Додаток А Довідки про впровадження результатів досліджень	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Додаток Б Аналітична модель МРРТ-функції системи керування інвертором напруги сонячної електростанції.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Додаток В Комп'ютерна модель системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги та її налаштування.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Додаток Д Підпрограма алгоритму інкрементної провідності	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

Додаток Е Підпрограма температурного алгоритму.**Error! Bookmark not defined.**

Додаток Ж Оцінка похибок першого та другого роду**Error! Bookmark not defined.**

Додаток К Список опублікованих праць за темою дисертації та  
відомості про апробацію результатів дисертації.....**Error! Bookmark not defined.**

## ВСТУП

**Актуальність теми.** 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 також певні недоліки: збільшення кількості силових ключів, ускладнена система керування комутацією та необхідність адаптації до вимог існуючої електроенергетичної системи при використанні їх в межах сонячних електростанцій.

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

На сьогоднішній день існує багато різних систем 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 мережевим багаторівневим інвертором напруги дані системи враховують такі параметри сонячного модуля: вихідну напругу, струм, рівень сонячної освітленості, температуру навколишнього середовища та самого модуля. Однак такі системи не 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 мережевим багаторівневим інвертором напруги при роботі з сонячним модулем та мережею шляхом розробки нових законів керування.

Дослідженню та створенню засобів керування багаторівневим інвертором напруги присвячена велика кількість робіт, авторами яких є: Г. Г. Жемеров, Н. В. Донской, С. Б. Крильцов, А. В. Гейст, Е. Н. Гречко, Д. В. Рожков, К. І. Єрмаков, М. А. Таранов, А. А. Шавьолкін, Т. Б. Гайтова, Г. С. Зінов'єв, К. Corzine, Т. О. Терещенко та багато інших.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Основний зміст роботи складають результати досліджень, що проводились на кафедрі електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті Вінницького національного технічного університету протягом 2013-2016 років. Науково-дослідна робота проводилась відповідно до наукового напрямку у ролі виконавця за держбюджетними темами «Розробка методів і засобів діагностування силового електрообладнання та керування режимами електричних мереж за реактивною потужністю і якістю електроенергії» (номер державної реєстрації № 0112U001369) та «Інтелектуалізація електроенергетичних систем з відновлювальними джерелами енергії на основі принципу Гамільтона-Остроградського» (номер державної реєстрації № 0115u001120).

**Метою роботи** є покращення якості електроенергії та підвищення енергоефективності мережевого багаторівневого інвертора напруги при роботі з сонячним модулем за рахунок вдосконалення системи керування.

**Об'єктом дослідження** в дисертаційній роботі є процеси керування мережевим багаторівневим інвертором напруги при роботі з сонячним модулем та мережею.

**Предметом дослідження** є система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги з сонячним модулем.

Відповідно до вказаної мети необхідно розв'язати такі **основні задачі**:

– провести аналіз існуючих систем керування мережевим багаторівневим інвертором напруги;

– на основі аналізу систем керування мережевим багаторівневим інвертором напруги розробити закони керування, які дозволяють утримувати режим роботи сонячного модуля в області точки відбору максимальної потужності та

враховують значення поточної та заданої напруг мережі й сонячного модуля, задане значення активної потужності з вузла мережі та задане значення поперечної складової струму, а також значення рівня освітленості, температури сонячного модуля та обмеження струму намагнічування трансформатора;

– за запропонованими законами розробити схеми систем керування мережевим багаторівневим інвертором напруги;

– шляхом комп'ютерного моделювання дослідити функціонування розроблених систем керування;

– розробити алгоритми та структуру мікропроцесорного пристрою для реалізації функцій регуляторів системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги;

– оцінити похибки роботи розробленого мікропроцесорного засобу системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги та знайти середній ризик.

Для розв'язання поставлених задач та аналізу прийнятих схемотехнічних та алгоритмічних рішень використані такі **методи дослідження**: теорії загальної електротехніки для опису процесів, які відбуваються в системі керування мережевим багаторівневим інвертором напруги, теорії автоматичного керування, для розробки законів регулювання поздовжньої та поперечної складових струму мережевого багаторівневого інвертора напруги, теорії схемотехніки та фотоелектроніки для створення електричних та структурних схем системи керування, методи комп'ютерного моделювання для дослідження перехідних процесів, що протікають в досліджуваній системі керування та для підтвердження адекватності розроблених математичних моделей, теорії ймовірностей для знаходження помилок першого і другого роду, аналітичні можливості комп'ютерної алгебри для здійснення розрахунків математичних моделей.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

– вперше розроблено закон регулювання повздовжньої складової струму мережевого багаторівневого інвертора, який враховує поточну та задану напругу

мережі й напругу сонячного модуля, що дозволяє оптимізувати роботу інвертора як зі сторони сонячного модуля, так і з боку мережі за напругою.

– вперше розроблено закон регулювання поперечної складової струму мережевого багаторівневого інвертора, який враховує задане значення активної потужності з вузла мережі та задане значення поперечної складової струму, яка необхідна для роботи інвертора в області точки відбору максимальної потужності, що дозволяє оптимізувати роботу інвертора за частотою;

– вдосконалено математичну модель системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги, що дозволяє враховувати температуру, струм і напругу сонячного модуля, параметри мережі та струм намагнічування трансформатора.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

- розроблено структурні схеми регуляторів системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги;

- створено комп'ютерні моделі розроблених систем керування мережевим багаторівневим інвертором напруги при роботі з сонячним модулем та мережею у середовищі Matlab Simulink, які дають змогу швидко визначити коефіцієнти для налагодження регуляторів.

- здійснена структурна реалізація схеми системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги в мікропроцесорному виконанні для реалізації функцій регуляторів повздовжньої та поперечної складових струму інвертора, що дозволяє підвищити гнучкість та спростити налагодження запропонованої системи.

Використання одержаних результатів дало можливість розробити та впровадити функціональні схеми систем керування мережевим багаторівневим інвертором напруги, які дозволяють реалізовувати розроблені закони керування, а також алгоритм роботи та структуру мікропроцесорного засобу для реалізації функції регуляторів системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги. Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджено в ТОВ «Енергоінвест» (акт впровадження від 15.06.2017 р.) та в навчальний процес



Вінницького національного технічного університету (акт впровадження від 27.06.2017 р.) (приведені в додатку А).

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні та розрахункові результати з формулюванням відповідних висновків отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: [5] – розроблено математичну модель автоматичних регуляторів повздовжньої та поперечної складових струму інвертора системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги; [6] – удосконалено математичну модель системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги з врахуванням температури сонячного модуля; [7] – розроблено комп'ютерну модель автоматичних регуляторів повздовжньої та поперечної складових струму інвертора для перевірки адекватності їх роботи; [9] – розроблено алгоритм функціонування системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги; [11] – вдосконалено систему керування мережевим багаторівневим інвертором напруги з врахуванням обмеження намагнічувального струму трансформатора.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких науково-технічних конференціях: XIII Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах» (м. Вінниця, 2016 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Техника и технология. Современные тенденции в науке и образовании / Inżynieria i technologia. Współczesne tendencje w nauce i edukacji» (м. Краков, 2016 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Екологічна безпека та відновлювальні джерела енергії» (м. Вінниця, 2016 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками» (м. Вінниця, 2017 р.); щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області на базі ВНТУ в 2013-2017 роках.

**Публікації.** Основний зміст роботи опублікований в 9 друкованих працях, в тому числі 5 фахових статей у наукових журналах, що входять до переліку ДАК України з яких 1 стаття входить до бібліографічної і реферативної бази даних SCOPUS, а також 3 статті в наукових періодичних журналах України та 1 тези доповіді.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (122 найменувань) і 7 додатків. Основний зміст викладений на 109 сторінках друкованого тексту, містить 54 рисунка, 4 таблиці. Загальний обсяг роботи – 153 сторінок.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] G. Masson, S. Orlandi, and M. Rekinge, “Global Market Outlook For Photovoltaics 2014-2018”, *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, и Ю. С. Скалько, “Высоковольтный асинхронный электропривод с трехуровневым автономным инвертором напряжения”, *Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського*, Випуск 4/2008 (51), Частина 1, с. 14-17.
- [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*, Vol. 2, Issue 8, August 2013.
- [5] С. М. Левицький, та В. С. Бомбик, “Система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги”, *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, Випуск 1 (33), с. 75-81, 2016.
- [6] V. Grabko, S. Levitskiy, V. Bombyk, W. Wojcik, O. Notra, and B. Imanbek, “Mathematical control system of grid-tied multilevel voltage inverter”, *Przeegląd Elektrotechniczny*, R. 93 NR 3, pp. 133-139, 2017.
- [7] 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.
- [8] В. С. Бомбик, “Комп’ютерне моделювання системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги”, *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, 2016.
- [Електронний ресурс]
- Доступно: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/478/477>

- [9] С. М. Левицький, та В. С. Бомбик, “Мікропроцесорний пристрій системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 3 (56), с. 70-76, 2016.
- [10] В. С. Бомбик, “Аналітична модель МРРТ-функції системи керування інвертором напруги сонячної електростанції”, *Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету (технічні науки)*, № 2 (29), с. 35-46, 2016.
- [11] 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.
- [12] В. С. Бомбик, «Система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги з обмеженням намагнічувального струму трансформатора», *"Електромеханічні і енергозберігаючі системи"*, №3, с. 61-69, 2017.
- [13] 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.
- [14] М. В. Гельман, М. М. Дудкин, и К. А. Преображенский, *Преобразовательная техника*. Челябинск: ЮУрГУ, 2009.
- [15] М. А. Таранов, и П. Т. Корчагин, “Многоуровневые и каскадные инверторы”, *Вестник аграрной науки Дона*, № 1, с. 63-66, 2013.
- [16] А. М. Литвиненко, и И. А. Неляпин, “Система управления многоуровневым преобразователем автономного электроснабжения”, *Электротехнические комплексы и системы управления*, №3, с. 25-27, 2015.
- [17] Т. В. Анисимова, и А. Н. Данилина, “Инверторы с многозонной модуляцией”, *Электронный журнал «Труды МАИ»*, №52, 2012.

[Электронный ресурс]. Доступно: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29546>

- [18] M. N. Kokate, and 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*, № 2(4), pp. 388-403, 2013.
- [19] В. Филатов, “Двух- и трехуровневые инверторы на IGBT. Перспективы решения”, *Силовая электроника*, №4, с. 38-41, 2012.
- [20] А. В. Левченко, “Трехфазный пятиуровневый широтно-импульсный преобразователь напряжения на основе трехуровневого инвертора”, *Электричество*, №4, с. 34-39, 2012.
- [21] К. Е. Михеев, и В. С. Томасов, “Анализ энергетических показателей многоуровневых полупроводниковых преобразователей систем электропривода”, *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*, № 1(77), с. 48-54, 2012.
- [22] D. Balakrishnan, D. Shanmugam, and K. Indiradevi, “Modified Multilevel Inverter Topology for Grid Connected Pv Systems”, *American Journal of Engineering Research (AJER)*, Volume-02, Issue-10, pp-378-384, 2013.
- [23] N. Adhikari, B. Singh, and A. L. Vyas, “Design and Control of Small Power Standalone Solar PV Energy System”, *Asian Power Electronics Journal*, Vol. 6, No. 1, 2012.
- [24] A. Teke, and M. B. Latran, “Review of Multifunctional Inverter Topologies and Control Schemes Used in Distributed Generation Systems”, *Journal of Power Electronics*, Vol. 14, No. 2, pp. 324-340, 2014.
- [25] 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, 2009, pp. 691–697.*

- [26] F. Z. Peng, J. S. Lai, J. McKeever, and J. VanCoevinger, “A multilevel voltage-source inverter with separate dc sources for static var generation,” in *Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95, Conference Record of the 1995 IEEE*, vol. 3, 1995, pp. 2541–2548.
- [27] Н. М. Колмаков, И. А. Баховцев, и А. Г. Гарганеев, “Анализ гистерезисного управления по напряжению автономного инвертора напряжения”, *Доклады ТУСУРа*, № 2, том 9, с. 84 -89, 2016.
- [28] M. P. Kazmierkowski, and L. Malesani, “Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: A survey”, *IEEE Trans. Ind. Electron*, Vol. 45, No. 5, pp. 691–703, 1988.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] M. A. Rahman, T. S. Radwan, A. M. Osheiba, and A. E. Lashine, “Analysis of Current Controllers for Voltage Source Inverter”, *IEEE Trans. Ind. Electron*, Vol. 44, No. 4, pp. 477–485, 1997.

- [34] 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.
- [35] Т. О. Терещенко, В. О. Беженар, і М. Ю. Білошицький, “Багаторівневий інвертор напруги з амплітудною широтно-імпульсною модуляцією”, *Технічна електродинаміка*, №4, с. 81-83, 2014.
- [36] И. А. Баховцев, “Анализ выходного напряжения многофазных четырехуровневых инвертором напргения с ШИМ”, *Доклады ТУСУРа*, № 3 (33), с. 175-180, 2014.
- [37] Е. Е. Чаплыгин, *Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией*. Учебное пособие по курсу «Моделирование электронных устройств и сиситем», Москва: Изд-во МЭИ, 2009.
- [38] Р. Т. Шрейнер, *Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты*, Екатеринбург: УрОРАН, 2000.
- [39] А. В. Переверзєв, і Д. О. Кузнецов, “Багаторівневий інвертор напруги”, Пат. 18870 Україна, МПК Н 02 М 7/505, № 200606585; Заявл. 13.06.2006; Оpub. 15.11.2006, Бюл. № 11.
- [40] J. Rodriguez, J. S. Lai, and F. Z. Peng, “Multilevel Inverters: Survey of Topologies, Controls, and Applications”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 49, No 4, pp. 724–728, 2002.
- [41] 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, July 2012.
- [42] О. М. Сінчук, Ю. Г. Осадчук, І. А. Козакевич, та І. Ю. Лісютенко, “Спосіб керування модульним багаторівневим інвертором напруги”, Пат. 95478 Україна, МПК Н02 М7/00. № u201407560, Оpub. 25.12.2014.

- [43] 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*, 1997, № 2, pp. 209-214.
- [44] 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.
- [45] L. M. Tolbert, and F. Z. Peng, “Multilevel converters for large electric drives”, *APEC '98*, pp.530-536, 1998.
- [46] Ю. Н. Чередник, А. С. Пашенко, Е. А. Ревякин, та В. О. Квашнин, “Частотно-регулируемый асинхронный электропривод, управляемый от автономного инвертора напряжения”, *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, № 4 (29), с. 86-93, 2012.
- [47] О. И. Григорьев, А. С. Какурин, и А. А. Фёдоров, “Цифровая система управления автономного инвертора напряжения с широтноимпульсной модуляцией”, *Журнал "Труды Псковского политехнического института"*, №13, с. 284-287, 2010.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] Р. Хегази, и В. И. Виссарионов, “Моделирование системы слежения за максимумом мощности фотоэлектрической панели”, *Журнал «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»*, №2, с. 50-53, 2012.



- [51] 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.
- [52] Н. В. Донской, А. Иванов, В. Матисон, и И. Ушаков, “Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики”, *Силовая электроника*, №1, с. 43-46, 2008.
- [53] 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*, Vol. 1, No.9, pp. 866-871, 2011.
- [54] A. Attou, A. Massoum, and M. Saidi, “Photovoltaic power control using mppt and boost converter”, *Balkan journal of electrical & computer engineering*, Vol.2, No.1, pp. 23-27, 2014.
- [55] 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*, Vol. 2, Special Issue 1, pp. 278-287, 2013.
- [56] 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*, Vol.4, No.3, pp. 801-809, 2014.
- [57] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method”, *IEEE transactions on power electronics*, Vol. 20, No. 4, pp. 963-973, 2005.
- [58] L. Piegari, R. Rizzo, I. Spina, and P. Tricoli, “Optimized adaptive perturb and observe maximum power point tracking control for photovoltaic generation”, *Energies*, №8, pp. 3418-3436, 2015.

- [59] A. Ahmad, and R. Loganathan, “Real-time implementation of solar inverter with novel mppt control algorithm for residential applications”, *Energy and Power Engineering*, №5, pp. 427-435, 2013.
- [60] C. I. Vinoth, and 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, Issue 3, March 2015.
- [61] 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*, Vol. 6, No. 3, 2016.
- [62] 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*, Vol.6, No.2, pp. 673-679, 2016.
- [63] E. M. Natsheh, and A. Albarbar, “Photovoltaic Model with MPP Tracker for Standalone/Grid Connected Applications”, in *IET Conference on Renewable Power Generation (RPG)*, 2011.
- [64] W. Christopher, and R. Ramesh, “Comparative Study of P&O and InC MPPT Algorithms”, *American Journal of Engineering Research (AJER)*, Vol. 02, No. 12, pp. 402-408.
- [65] 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.
- [66] 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*, № 15, p. 334-344, 2015.

- [67] A. H. El Khateb, A. R. Nasrudin, and J. Selvaraj, “Ćuk-Buck Converter for Standalone Photovoltaic System”, *Journal of Clean Energy Technologies*, №1, Vol. 1, pp. 69-74, 2013.
- [68] C. I. Vinoth, and 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, Issue 3, pp. 1673-1678, 2015.
- [69] С. А. Іванець, та 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.
- [70] S. Pandey, and D. Sharma, “Multilevel inverter topologies or photovoltaic grid connections: a review”, *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, Vol. 3, Issue 5, pp. 93-95, 2015.
- [71] Г. П. Охоткин, и А. Г. Серебrenиков, “Основные принципы построения автономных солнечных электростанций”, *Современные проблемы науки и образования*, №6, 2012. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.science-education.ru/106-7345>.
- [72] S. Saridakis, E. Koutroulis, and F. Blaabjerg, “Optimal Design of Modern Transformerless PV Inverter Topologies”, *IEEE transactions on energy conversion*, Vol. 28, No. 2, pp. 394-404, 2013.
- [73] 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.
- [74] F. Schimpf, and 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\\_Co](https://www.researchgate.net/publication/27516824_Grid_Connected_Co)

[nverters for Photovoltaic State of the Art Ideas for Improvement of Transformerless Inverters](#)

- [75] M. Islam, S. Mekhilef, and M. Hasan, “Single phase transformerless inverter topologies for grid-tied photovoltaic system: A review”, *Renewable and sustainable energy reviews*, № 45, pp. 69–86, 2015.
- [76] J. M. A. Myrzik, and 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)
- [77] 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.
- [78] 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*, Vol. 15, No. 1, pp. 256-267, 2015.
- [79] 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*, Vol. 2, Special Issue 1. pp. 278-287, 2013.
- [80] 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)*, Vol.1, No. 9, pp. 866-871, 2011.
- [81] 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, Vol. 10, pp. 141-149, 2010.
- [82] 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).
- [83] A. Abdalrahman, A. Zekry, and A. Alshazly, “Simulation and implementation of grid-connected inverters”, *International journal of computer applications*, Vol. 60, No. 4, pp. 41-49, 2013.
- [84] T. Hornik, and 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*, Vol. 26, No. 3, pp. 943-952, 2011.
- [85] S. S. Mujawa, and 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, Issue 2, 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)
- [86] 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.
- [87] С. М. Левицький, “Система керування багаторівневим інвертором сонячної електричної станції”, *Електротехніка і Електромеханіка*, №5, с. 26-29, 2015.
- [88] M. Yue, and X. Wang, “A Revised Incremental Conductance MPPT Algorithm for Solar PV Generation Systems”, *Sustainable Energy*

*Technologies Department Brookhaven National Laboratory Upton, NY*  
11973, USA, Jan 2015

- [89] FR-A700 Преобразователь частоты. Руководство по эксплуатации, с. 246-249, 2012. [Online]. Available: <http://mitsubishi.drives-ua.com/pdf/fr-a700-operating-instructions.pdf>
- [90] А. А. Усольцев, *Частотное управление асинхронными двигателями*, Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006.
- [91] S. E. Babaa, M. Armstrong, and 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.
- [92] 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.
- [93] H. N. Zainudin, and 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.
- [94] G. M. S. Azevedo, M. C. Cavalcanti, K. C. Oliveira, F. A. S. Neves, and 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)
- [95] K. S. Tey, and 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>

- [96] S. Gomathy, S. Saravanan, and 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>
- [97] K. K. Kumar, R. Bhaskar, and 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*, No. 12, pp. 705-715, 2014.
- [98] Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, та О. Б. Мокін, *Математичні методи ідентифікації електромеханічних процесів*. Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005.
- [99] В. М. Руденко, *Математична статистика*. Навчальний посібник. К.: Центр учбової літератури, 2012.
- [100] В. П. Дьяконов, *Справочник по MathCAD PLUS 7.0 PRO*. М.: СК Пресс, 1988.
- [101] А. Гультияев, *MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: практическое пособие*. СПб.: КОРОНА принт, 1999.
- [102] В. Г. Потемкин, и П. И. Рудаков. *Система MATLAB 5 для студентов*.  
2-е изд. — М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999.
- [103] В. А. Бесекерский, и Е. П. Попов, *Теория систем автоматического регулирования*. М.: Наука, 1975.
- [104] А. А. Воронов, В. К. Титов, и Б. Н. Новогранов, *Основы теории автоматического регулирования и управления*. М.: Высшая школа, 1977.
- [105] В. П. Дьяконов, *Simulink 4. Специальный справочник*. СПб.: Питер, 2002.
- [106] Й. Й. Білинський, К. В. Огороднік, та М. Й. Юкиш, *Електронні системи: навчальний посібник*. Вінниця: ВНТУ, 2011.

- [107] Н. Г. Вишняков, В. И. Кочкин, и В. К. Стрюцков, “Применение микропроцессорной техники для регулирования напряжения в электрических сетях”, *Обз. инф. Сер. Средства и системы управления в энергетике. Информэнерго*, №2, с. 1–58, 1990.
- [108] Б. В. Шевкопляс, *Микропроцессорные структуры. Инженерные решения*. Справочник. – 2 – е изд. перераб и доп. – М.: Радио и связь, 1990.
- [109] Б. Б. Абрайтис, Н. Н. Аверьянов, и А. И. Белоус, *Микропроцессоры и микропроцессорные комплекты интегральных микросхем: Справочник*. М.: Радио и связь, 1988.
- [110] І. В. Чумаченко, М. Д. Кошовий, і В. В. Лопатин, *Мікроконтролерні прилади: структура і використання: Навчальний посібник*. Харків: Нац. аерокосмічний ун–т “ХАІ”, 2001.
- [111] 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, Iss. 5, pp. 1294–1304, 2014.
- [112] 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.
- [113] 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, Iss. 10, pp. 342-347, 2014.
- [114] M. A. A. M. Zainuri, M. A. M. Radzi, A. C. Soh, N. Mariun, N. A. Rahim, and S. Hajighorbani, “Fundamental Active Current Adaptive Linear Neural Networks for Photovoltaic Shunt Active Power Filters”, *Energies*, No. 9, pp. 397, 2016.



- [115] R. Faranda, and S. Leva, “Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems”, *WSEAS Trans. Power Syst*, No. 3, pp. 446–455, 2008.
- [116] S. Mikkili, and 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.
- [117] 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.
- [118] Б. Б. Дунаев. *Точность измерений при контроле качества*. К.: Техніка, 1981.
- [119] В. С. Королюк, Н. И. Портенко, А. В. Скороход, и А. Ф. Турбин, “Справочник по теории вероятностей и математической статистике”, М.: Наука, 1985.
- [120] Е. С. Венцель, и Л. А. Овчаров, *Теория случайных процессов и ее инженерные приложения*. М.: Наука, 1991.
- [121] Є. Т. Володарський, та І. П. Москаленко, “Підвищення вірогідності контролю з застосуванням адаптивного алгоритму”, *Наукові вісті НТУУ ”КПІ”*, №3, с. 111 – 114, 1999.
- [122] М. Дорожовець, В. Мотало, та Б. Стадник, *Основи метрології та вимірювальної техніки: У 2 т.* За ред. Б. Стадника. Львів.: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2005.