



УДК 621.341

DOI: 10.37128/2520-6168-2024-1-13

**ОСОБЛИВОСТІ КОНФІГУРАЦІЇ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ІНВЕРТОРІВ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК**

БОЙКО Сергій Миколайович, к.т.н., доцент
Національний університет «Запорізька політехніка»
ЖУКОВ Олексій Анатолійович, к.т.н., доцент
КОВАЛЬ Андрій Миколайович, к.т.н.
БОМБИК Вадим Сергійович, к.т.н.
Вінницький національний технічний університет

Serhii BOIKO, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Zaporizhzhya Polytechnic National University
Oleksii ZHUKOV, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Andriy KOVAL, Candidate of Technical Sciences
Vdym BOMBIK, Candidate of Technical Sciences
Vinnytsia National Technical University

Актуальним на сьогоднішній день є питання енергозабезпечення та впровадження екологічних систем генерації електричної енергії, що актуально у тому числі в аграрному секторі економіки. Це питання є важливим не тільки на державному рівні, але й на рівні світової спільноти. Провідні країни світу активно впроваджують передові світові технології щодо декарбонізації енергетичного сектору. Одним з варіантів впровадження альтернативних та відновлювальних джерел енергії в аграрному секторі економіки провідних країн світу є застосування фотоелектричних систем. Застосування сучасних джерел електричної енергії також притаманне і транспортній галузі. Одним із варіантів такого впровадження використання фотоелектричних систем в електричних мережах електричного транспорту та допоміжних система та комплексах інфраструктури. Також, слід звернути увагу на сучасні світові тенденції, щодо розвитку розподілених енергетичних системах, котрим характерні в значній мірі застосування нових прогресивних розробок силової електроніки. Також, слід звернути увагу на сучасні світові тенденції, щодо розвитку розподілених енергетичних системах, котрим характерні в значній мірі застосування нових прогресивних розробок силової електроніки, котрі вже застосовуються у різних сферах економіки.

Тож, мережеві перетворювачі електричної енергії, котрі експлуатуються у складі систем розподіленої генерації та у складі комплексів на базі відновлювальних джерел електричної енергії мають відповідати параметрам мережі, а їх система управління має бути адаптивною до стохастичних режимів роботи мережі та режимів генерування відновлювальними джерелами електричної енергії. Між тим, слід звернути увагу на синхронізацію трифазних перетворювачів електричної енергії з електричною мережею, до якої вони під'єднані, що має бути забезпечено системою регулювання їх роботи. Слід зазначити, що структури систем управління мережевих перетворювачів мають суттєву відмінність від структур систем управління автономних перетворювачів, що безпосередньо стосується інверторів. Такий стан справ пов'язаний з особливістю функціонування мережевих інверторів. Оскільки вказані перетворювачі мають змодульовану синусоїдну напругу за допомогою ШІМ сформувати у відповідності до показників мережі до якої вони під'єднані.

Тож, актуальним є питання синтезу математичного методу, котрий дозволить спростити розробку системи автоматичного керування а також оптимізувати обчислювальні ресурси контролера керування силовим перетворювачем для фотоелектричних систем. На основі аналітичних даних, можна з повною впевненістю прогнозувати післявоєнний розвиток економіки України на основі впровадження сучасних прогресивних технологій у галузі енергетики. На сьогоднішній день, сталий розвиток економічної та енергетичної складової економіки України відтермінується. Між тим, системи генерування електричної енергії залишаються пріоритетними у контексті не тільки впровадження у діючі системи електропостачання, а й актуальні у контексті національної енергетичної безпеки. В роботі розглянуто використання перетворення Парка при розробці систем керування мережевими інверторами фотоелектричних систем. Результати дослідження, котрі були



проведені на інверторах, системи керування яких побудовані за допомогою запропонованого математичного апарата, підтверджують високу точність та ефективність управління, не витрачаючи при цьому великої кількості обчислювальних ресурсів мікроконтролера. Запропонований підхід побудови систем керування інверторів фотоелектричних систем дозволить підвищити ефективність функціонування фотоелектричних систем що зробить їх більш економічно привабливими для впровадження в аграрному секторі економіки.

Ключові слова: інвертор, фотоелектрична система, система координат, фазовий автопідлаштувач частоти, перетворення Парка.

Ф. 3. Рис. 3. Літ. 9.

1. Вступ

Актуальним на сьогоднішній день є питання енергозабезпечення та впровадження екологічних систем генерації електричної енергії, що актуально у тому числі в аграрному секторі економіки. Це питання є важливим не тільки на державному рівні, але й на рівні світової спільноти. Провідні країни світу активно впроваджують передові світові технології щодо декарбонізації енергетичного сектору. Одним з варіантів впровадження альтернативних та відновлювальних джерел енергії в аграрному секторі економіки провідних країн світу є застосування фотоелектричних систем.

Застосування сучасних джерел електричної енергії також притаманне і транспортній галузі. Одним із варіантів такого впровадження використання фотоелектричних систем в електричних мережах електричного транспорту та допоміжних система та комплексах інфраструктури.

Також, слід звернути увагу на сучасні світові тенденції, щодо розвитку розподілених енергетичних системах, котрим характерні в значній мірі застосування нових прогресивних розробок силової електроніки, котрі вже застосовуються у різних сферах економіки [1]. Тож, мережеві перетворювачі електричної енергії, котрі експлуатуються у складі систем розподіленої генерації та у складі комплексів на базі відновлювальних джерел електричної енергії мають відповідати параметрам мережі, а їх система управління має бути адаптивною до стохастичних режимів роботи мережі та режимів генерування відновлювальними джерелами електричної енергії.

Між тим, слід звернути увагу на синхронізацію трифазних перетворювачів електричної енергії з електричною мережею, до якої вони під'єднані, що має бути забезпечено системою регулювання їх роботи.

Слід зазначити, що структури систем управління мережевих перетворювачів мають суттєву відмінність від структур систем управління автономних перетворювачів, що безпосередньо стосується інверторів. Такий стан справ пов'язаний з особливістю функціонування мережевих інверторів. Оскільки вказані перетворювачі мають змодульовану синусоїдну напругу за допомогою ШІМ сформувані у відповідності до показників мережі до якої вони під'єднані.

Тож, актуальним є питання синтезу математичного методу, котрий дозволить спростити розробку системи автоматичного керування а також оптимізувати обчислювальні ресурси контролера керування силовим перетворювачем для фотоелектричних систем.

2. Постановка проблеми

Екологічне навантаження на довкілля порушує природний баланс в екосистемі вцілому, спричиняючи екологічні катаклізми, на негативно впливаючи на економічні показники агропромислового комплексу. Одним із завдань щодо зменшення екологічного навантаження на екосистему на сьогодні є декарбонізація [1-6].

За результатами аналізу ряду досліджень і публікацій є можливість зробити висновок, що дослідження вчених активно розвиваються у контексті декарбонізації у різних сферах економіки. Між тим, залишаються невирішеними питання оптимального відбору потужності від джерел з стохастичним характером генерації електричної енергії. Такий стан справ обмежує функціональні можливості систем та гальмує активне впровадження існуючих розробок фотоелектричних систем без подальшого доопрацювання в аграрному секторі економіки, зважаючи на специфіку застосування у даній сфері [5-9].

3. Аналіз останніх досліджень та публікацій

На основі аналітичних даних, можна з повною впевненістю прогнозувати післявоєнний розвиток економіки України на основі впровадження сучасних прогресивних технологій у галузі енергетики. На сьогоднішній день, сталий розвиток економічної та енергетичної складової економіки



України відтермінується. Між тим, системи генерування електричної енергії залишаються пріоритетними у контексті не тільки впровадження у діючі системи електропостачання, а й актуальні у контексті національної енергетичної безпеки [5].

Сучасна синхронізація в мережах з трифазними перетворювачами значно відрізняється від простого застосування трьох окремих систем синхронізації, характерних для однофазних інверторів. У трифазній системі фази пов'язані між собою та працюють скоординовано, підтримуючи постійний кут зсуву фаз і послідовність їх чергування. Це робить трифазну напругу складнішою, представляючи її як вектор із трьох компонентів напруги (рис. 1), що дозволяє ефективно генерувати та використовувати потужність у трифазних системах.

Величина та швидкість обертання трифазного вектора напруги утримуються на незмінному рівні, коли в усіх трьох фазах наявні синусоїдальні напруги з однаковими амплітудами, частотами та взаємними фазовими зсувами. Такий підхід до представлення напруги спрощує її обробку за допомогою сучасних цифрових сигнальних процесорів, що знаходять застосування в системах управління мережевими перетворювачами. Завдяки цим пристроям також здійснюється синхронізація напруг, генерованих перетворювачами, з електричною мережею для забезпечення їх паралельної роботи.

Здебільшого процес синхронізації ґрунтуються на використанні системи програмного фазового автопідлаштування частоти (ФАПЧ). ФАПЧ представляє собою систему автоматичної корекції, яка налаштовує частоту генератора для її відповідності частоті опорного сигналу. Це досягається через використання негативного зворотного зв'язку, де вихідний сигнал керованого генератора порівнюється з опорним сигналом на фазовому детекторі, результат порівняння служить основою для управління частотою генератора [3].

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi) \\ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi\right) \\ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi\right) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$|V| = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2} = \sqrt{\frac{3}{2}}V, \quad (2)$$

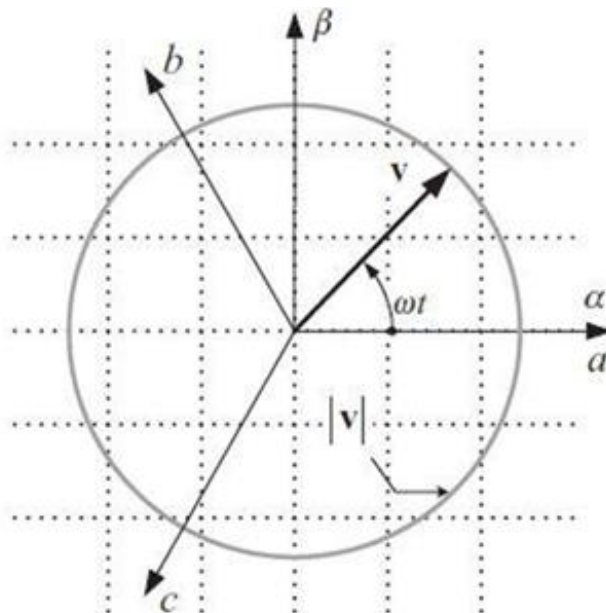


Рис. 1. Графічне одновекторне відображення напруги трифазної мережі

З посеред інших, широкого застосування має метод синхронізації мережеских інверторів, а саме програмне ФАПЧ, котре має реалізацію за принципом цифрового управління [4] на базі математичного апарату, у тому числі з використанням перетворення Парка (Park Transform), котре має активне застосування при перетвореннях струмів з двофазної нерухомої системи координат у обертову систему



інсоляції.

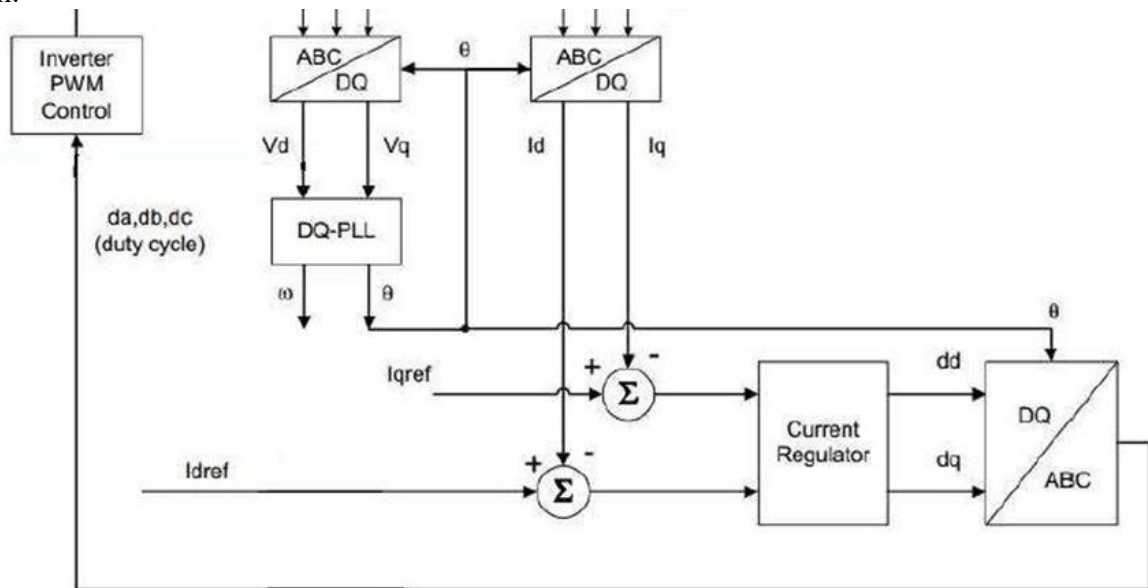


Рис. 3. Структура системи автоматичного управління мережевого інвертора

Враховуючи той факт, що фотоелектричні системи на сьогоднішній день мають активне впровадження на теренах України та світу та враховуючи проблематику енергозабезпечення агропромислового сектору економіки як загальносвітової проблеми та окремих аграрних підприємств актуальною є будь-яка розробка направлена на вирішення цього завдання. Тому, актуальною залишається модернізація та вдосконалення усіх без винятку систем генерації електричної енергії, особливо на базі відновлювальних джерел енергії.

6. Висновки

В роботі розглянуто використання перетворення Парка при розробці систем керування мережевими інверторами фотоелектричних систем.

Результати дослідження, котрі були проведені на інверторах, системи керування яких побудовані за допомогою запропонованого математичного апарата, підтверджують високу точність та ефективність управління, не витрачаючи при цьому великої кількості обчислювальних ресурсів мікроконтролера.

Запропонований підхід побудови систем керування інверторів фотоелектричних систем дозволить підвищити ефективність функціонування фотоелектричних систем що зробить їх більш економічно привабливими для впровадження в аграрному секторі економіки.

Список використаних джерел

1. Бойко С. М. Теоретичні засади формування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації гірничорудних підприємств: монографія. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2020. 263 с.
2. Бойко С. М., Жуков О. А., Саблін О. І., Риков Г. Ю. Принципи застосування альтернативних джерел енергії в регіонах з обмеженими ресурсами питної води. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 3. С. 116–123.
3. Кудрі С. О. Відновлювані джерела енергії. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.
4. Стаднік М. І., Проценко Д. П., Бабій С. М. Гібридне електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 4 С. 33–41
5. Кудрі С. О. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. 82 с.
6. Kazmierkowski M., Krishnan R., Blaabjerg F. Control in Power Electronics – Selected Problems, Academic Press, 2002.



7. Manish Bhardwaj. Software Phase Locked Loop Design Using C2000™ Microcontrollers for Three Phase Grid Connected Applications. - Application report. Texas Instruments. November 2013
8. Teodorescu R., Blaabjerg F., Flexible Control of Small Wind Turbines with Grid Failure Detection Operating in Stand-alone and Grid-Connected Mode. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19, September 2004, 1323–1332.
9. Kaura V., Blasco V. Operation of a Phase Locked Loop System under Distorted Utility Conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 33, January/February 1997, 58–63.

References

- [1] Boyko, S. M., Sinchuk, O. M. (Eds.). (2020). *Teoretychni zasady formuvannia elektroenerhetychnykh system z dzherelamy rozoseredzhenoi heneratsii hirnychorudnykh pidpriemstv: monohrafiia [Theoretical foundations of the formation of electric power systems with sources of distributed generation of mining enterprises: monograph]*. Kremenchuk: «PP Shcherbatykh O.V.» [in Ukrainian].
- [2] Boiko, S.M., Zhukov, O.A., Sablin, O.I., Rykov, H. Y. (2023). Pryntsyepy zastosuvannia alternatyvnykh dzherel enerhii v rehionakh z obmezhenymy resursamy pytnoi vody [Principles of application of alternative energy sources in regions with limited drinking water resources]. *Engineering, energy, transport AIC*, 3, 116–123. [in Ukrainian].
- [3] Kudrya, S. O. (Eds.). (2020). *Vidnovlyuvani dzherela energiyi [Renewable energy sources]*. Kiyiv: Institut vidnovlyuvanoyi energetiki NANU. [in Ukrainian].
- [4] Stadnik, M. I., Protsenko, D. P., Boiko, S. M. (2020). Hibrydne elektropostachannia z vykorystanniam vidnovliuvanykh dzherel enerhii [Hybrid power supply using renewable energy sources]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 4, 33–41 [in Ukrainian].
- [5] Kudrya, S.O. (Eds.). (2020). *Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh dzherel enerhii Ukrainy [Atlas of the energy potential of renewable energy sources of Ukraine]*. Kiyiv: Institut vidnovlyuvanoyi energetiki NANU. [in Ukrainian].
- [6] Kazmierkowski, M., Krishnan, R., Blaabjerg, F. (2002). *Control in Power Electronics – Selected Problems*. Academic Press. [in English].
- [7] Bhardwaj, M. (2013). *Software Phase Locked Loop Design Using C2000™ Microcontrollers for Three Phase Grid Connected Applications. - Application report*. Texas Instruments. [in English].
- [8] Teodorescu, R., Blaabjerg, F. (2004). Flexible Control of Small Wind Turbines with Grid Failure Detection Operating in Stand-alone and Grid-Connected Mode. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19, 1323–1332. [in English].
- [9] Kaura, V., Blasco, V. (1997). Operation of a Phase Locked Loop System under Distorted Utility Conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 33, 58–63. [in English].

FEATURES OF THE CONFIGURATION OF CONTROL SYSTEMS FOR PHOTOVOLTAIC INVERTERS

Today, the issue of energy supply and the implementation of ecological systems of electricity generation is relevant, including in the agricultural sector of the economy. This issue is important not only at the state level, but also at the level of the world community. The world's leading countries are actively implementing world-leading technologies for the decarbonization of the energy sector. One of the options for the introduction of alternative and renewable energy sources in the agricultural sector of the economy of the leading countries of the world is the use of photovoltaic systems. The use of modern sources of electrical energy is also inherent in the transport industry. One of the options for such implementation is the use of photovoltaic systems in electrical networks of electric transport and auxiliary systems and infrastructure complexes. Also, attention should be paid to modern global trends in the development of distributed energy systems, which are characterized to a large extent by the use of new progressive developments in power electronics. Also, attention should be paid to modern world trends in the development of distributed energy systems, which are characterized by the use of new progressive developments in power electronics, which are already used in various areas of the economy [1]. Therefore, network converters of electrical energy, which are operated as part of distributed generation systems and as part of complexes based on renewable sources of electrical energy, must meet the parameters of the network, and their control system must be adaptive to stochastic modes of network operation and modes of generation by renewable sources of electric energy. Meanwhile, attention should be paid to the synchronization of three-phase electrical energy converters with



the electrical network to which they are connected, which must be ensured by a system for regulating their operation. It should be noted that the structures of control systems of network converters have a significant difference from the structures of control systems of autonomous converters, which directly concerns inverters. This state of affairs is connected with the peculiarity of the functioning of network inverters. Since the specified converters have a modulated sinusoidal voltage using PWM to form in accordance with the parameters of the network to which they are connected. Therefore, the issue of synthesizing a mathematical method that will simplify the development of an automatic control system and also optimize the computing resources of the power converter control controller for photovoltaic systems is relevant. On the basis of analytical data, it is possible to predict with full confidence the post-war development of Ukraine's economy based on the introduction of modern progressive technologies in the field of energy. To date, the sustainable development of the economic and energy component of Ukraine's economy is postponed. Meanwhile, electric power generation systems remain a priority in the context of not only implementation into existing power supply systems, but also relevant in the context of national energy security. The paper considers the use of Park's transformation in the development of control systems for network inverters of photovoltaic systems. The results of the research, which were conducted on inverters whose control systems were built using the proposed mathematical apparatus, confirm high control accuracy and efficiency, without spending a large amount of computing resources of the microcontroller. The proposed approach to building control systems for inverters of photovoltaic systems will allow to increase the efficiency of the operation of photovoltaic systems, which will make them more economically attractive for implementation in the agricultural sector of the economy.

Key words: inverter, photovoltaic, coordinate system, PLL, Park transformation

Eq. 3. Fig. 3. Ref. 9.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

БОЙКО Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент. Національний університет «Запорізька політехніка» (вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063 e-mail: boiko_s_n@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-9778-2202>).

ЖУКОВ Олексій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент. Вінницький національний технічний університет (Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: alex4444_2004@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7451-7633>).

КОВАЛЬ Андрій Миколайович – кандидат технічних наук. Вінницький національний технічний університет (Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: koval.a.m@vntu.edu.ua).

БОМБИК Вадим Сергійович – кандидат технічних наук. Вінницький національний технічний університет (Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: vsbombyk@gmail.com).

Serhii BOIKO – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor. Zaporizhzhya Polytechnic National University (street Zhukovsky, 64, Zaporozhye, Ukraine, 69063 e-mail: boiko_s_n@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-9778-2202>).

Oleksii ZHUKOV – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor. Vinnytsia National Technical University (Khmelnitsky hwy, 95, Vinnytsia, Ukraine, 21008 e-mail: alex4444_2004@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7451-7633>).

Andriy KOVAL – Candidate of Technical Sciences. Vinnytsia National Technical University (Khmelnitsky hwy, 95, Vinnytsia, Ukraine, 21008 e-mail: koval.a.m@vntu.edu.ua).

Vadym BOMBIK – Candidate of Technical Sciences. Vinnytsia National Technical University (Khmelnitsky hwy, 95, Vinnytsia, Ukraine, 21008 e-mail: vsbombyk@gmail.com).