

*С.Ю. КРИВОШЕЄВ, В.В. ВАРВ'ЯНСЬКА, О.В. ЄРЕСЬКО, О.О. ЧЕПЕЛЮК, О.О. ДАВИДЕНКО*

### ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ

Розглянута структура фотоелектричної станції середньої потужності з можливістю передачі енергії в промислову мережу. Запропоновані рішення для спрощення схемотехніки перетворювальної частини сонячної станції, спрямовані на зниження її собівартості. Проведено експериментальні дослідження особливостей функціонування сонячної станції. Розглянуто можливі аварійні режими роботи сонячної станції та надано рекомендації щодо їх усунення. Проведено аналіз експериментальних досліджень і на їх основі запропоновано шляхи підвищення ККД станції.

**Ключові слова:** фотоелектрична станція, сонячна батарея, ШПП, інвертор, перетворювач, МРРТ.

*С.Ю. КРИВОШЕЄВ, В.В. ВАРВ'ЯНСКАЯ, А.В. ЕРЕСЬКО, А.А. ЧЕПЕЛЮК, А.А. ДАВИДЕНКО*

### ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ

Рассмотрена структура фотоэлектрической станции средней мощности с возможностью передачи энергии в промышленную сеть. Предложены решения для упрощения схемотехники преобразовательной части солнечной станции, направленные на снижения ее себестоимости. Проведены экспериментальные исследования особенностей функционирования солнечной станции. Рассмотрены возможные аварийные режимы работы солнечной станции и даны рекомендации по их устранению. Проведен анализ экспериментальных исследований и на их основании предложены пути повышения КПД станции.

**Ключевые слова:** фотоэлектрическая станция, солнечная батарея, ШИП, инвертор, преобразователь, МРРТ.

*S.Yu. KRYVOSHEIEV, V.V. VARVIANSKA, O.V. ERESKO, O.O. CHEPELUK, O.O. DAVYDENKO*

### SUN STANSHE

The structure of a small-scale photovoltaic station, which can be used on single structures, is considered. At the same time, it is desirable to have a backup the battery on accumulators for reliable power supply and to be connected to the industrial network. Thus, the structure of the photovoltaic station, which has the ability to accumulate energy in the battery on accumulators and transfer the remnants to the industrial network, using it as a reservoir of infinite capacity, is proposed. The influence on the production of electricity from the photovoltaic station is shown due to the unevenness of the illumination of the surface of the solar panels. The possibilities of reducing losses from the unevenness of generation of electric energy are considered. The proposed solutions for simplification of the circuitry of the converting part of the solar station, aimed at reducing its cost. A substantiation of the transformer part of the solar station, which includes a unit of couplers with solar panels and an inverter unit, is grounded. The algorithm of operation of the control system aimed at supporting the current, selected from the solar station is proportional to the power of this station, is proposed. The structure of the physical model of the transforming part of the solar station is proposed. Selected main active components of the power unit of the solar station. The physical model of the transforming part of the solar station with microcontroller control was performed, which confirmed the effectiveness of the technical solutions proposed in the work. Estimated losses on the main elements of the transforming part of the solar station. It is indicated that the losses are due to low voltage supply. Considered possible emergency modes of operation of the solar station and provided recommendations for their elimination. The proposed solutions for the simplification of the circuitry of the converting part of the solar station, aimed at reducing its cost and increasing the efficiency of the station.

**Key words:** photovoltaic station, solar battery, pulse-width converter, inverter, converter, МРРТ.

**Вступ.** Одним із напрямків розвитку відновлюваної енергетики в Україні є фотовольтаїка, що передбачає, в тому числі, перетворення енергії фотоелектричної станції в енергію змінного струму з віддачею в промислову мережу, яку можна уявити як акумулятор практично нескінченної ємності [1].

У статті розглядається структура сонячної станції, яка об'єднує невелику групу сонячних панелей (від двох до п'яти) і при потужності одиночної панелі від 20 Вт до 50 Вт, здатну працювати як на промислову мережу, так і на акумулятор. При цьому акумулятор розрахований на прийом не більше 10 % максимальної енергії сонячних панелей. Такі сонячні станції можуть експлуатуватися як в індивідуальному господарстві [2], так і на деяких одиночних об'єктах [3]. Вартість обладнання і складність схемотехніки таких систем є важливим фактором.

**Огляд систем перетворення світлової енергії.** Одним із недоліків, що впливають на якісні

показники перетворення світлової енергії, є нерівномірність інтенсивності сонячного випромінювання. Зокрема, частина панелей може перебувати в тіні, що негативно впливає на продуктивність усіх без винятку модулів і навіть тих, які знаходяться під сонцем. Практично неможливо уникнути затемнення частини поверхні сонячних панелей, особливо в ранковий або вечірній час, коли кут між напрямком падіння світлового променя і нормаллю до поверхні панелі великий, що призводить до нерівномірності генерування. Для отримання необхідної потужності та робочої напруги модулі панелі з'єднують послідовно і паралельно.

На виході сонячних панелей з'єднаних послідовно напруга, що генерується, підсумовується, але сила струму в усіх модулях буде однаковою. На рис.1а шунтуючі діоди VD (Bypass diode), що вбудовуються в сучасні сонячні панелі, при послідовному з'єднанні відсікають панель з низькими енергопоказниками, що призводить до зниження сумарної напруги [4].

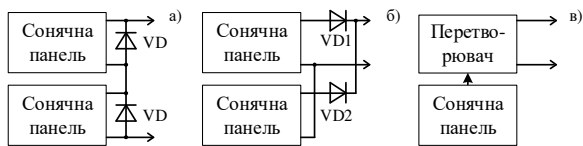


Рис. 1. Варіанти з'єднання сонячних панелей:  
 а – послідовно, з шунтуючими діодами (Bypass diode);  
 б – паралельно, з розділювальними діодами;  
 в – з узгоджувальним перетворювачем.

Паралельне з'єднання сонячних панелей призводить до підсумовування струмів всіх панелей. Однак, щоб струм панелей з більшою напругою не перетікав в панель з меншою, яка знаходиться в тіні, вводяться розділювальні діоди VD1 та VD2, показані на рис. 1б.

З метою підвищення ефективності виробництва електроенергії рекомендується використовувати власний узгоджувальний перетворювач для кожної сонячної панелі (рис. 1в) та, бажано, з МРРТ (Maximum power point tracker) [5] а також з мікроінверторами для кожної сонячної батареї.

Нижче наведено вибір варіанту перетворювача постійної напруги сонячної станції в змінну та його схематехніка.

**Обґрунтування перетворювальної частини.**

Перетворення постійної напруги від сонячних панелей у змінну промислової частоти можливо як за допомогою інвертора напруги, так і за допомогою інвертора струму. Схематехнічно інвертори можуть бути виконані як за мостовою, так і за напівмостовою схемами. Безсумнівно, виникає питання про фазність інвертора - однофазний або трифазний? Для невеликих потужностей вибір зроблений на користь однофазного [7]. Якщо розглядати варіант мостового або напівмостового перетворювача - то вибір схиляється на користь напівмостового, виконаного за нульовою схемою [8], що має переваги як по простоті керування ключами (обидва емітери інвертора підключені до загального проводу), так і за кількістю компонентів (напівмостовий простіший та дешевший) [9]. Крім цього, нульова схема має вищий ККД, що важливо при невеликих напругах джерела живлення. Однак нульова схема вимагає спеціальний трансформатор, який також необхідний для перетворення напруги джерела живлення до рівня промислової мережі і забезпечує гальванічну розв'язку.

Перетворювальна частина сонячної станції складається з двох блоків:

- блок перетворювачів сполучення з сонячними панелями;
- інверторний блок.

Загальним для них є фільтровий накопичувальний конденсатор (НК) показаний на рис. 2.

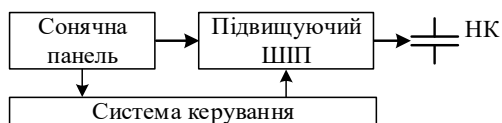


Рис. 2 Структура перетворювача сполучення з сонячними панелями

Перетворювачі сполучення з сонячними панелями містять підвищуючий ШП (широтно-імпульсний перетворювач) на кожну сонячну панель, який забезпечує стеження за точкою максимальної потужності сонячної панелі, передаючи енергію в загальний для всієї системи накопичувальний конденсатор.

Інверторна частина перетворює енергію накопичувального конденсатора (НК) в енергію змінного струму і передає її в промислову мережу. Інвертор виконується на базі інвертора струму, а роль регульованого джерела струму виконує понижуючий ШП, функціональна схема якого зображена на рис. 3 [6].



Рис. 3 Функціональна схема інверторної частини перетворювача

**Система керування.** Мікроконтролерна система керування виконує основний алгоритм роботи станції - формує керуючі сигнали для всіх ШП та інвертора: вимірює струм і напругу для системи МРРТ, контролює працездатність блоків і вузлів.

Алгоритм роботи системи керування понижуючим ШП побудовано таким чином, щоб напругу на конденсаторі НК підтримувати незмінною (рис. 4). Якщо напруга на конденсаторі підвищується, то це означає що струм станції  $i_z$  більший відбираемого розряджаючого струму  $i_p$  і система керування збільшує струм  $i_p$  до тих пір, поки напруга на конденсаторі не змінюватиметься. Зі зменшенням напруги на накопичувальному конденсаторі система керування зменшує відбираемий струм  $i_p$  доки напруга на конденсаторі не змінюватиметься. Таким чином, система керування понижуючим ШП контролює тільки напругу на конденсаторі, регулюючи відбираемий струм, при цьому величина цього струму буде пропорційна потужності, яка генерується сонячними панелями.

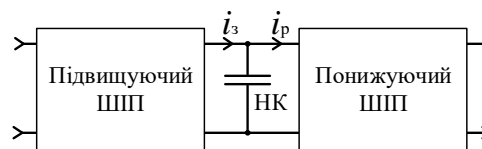


Рис. 4. Структура, яка підтримує рівність струмів

Понижуючий ШП формує струм пропорційно потужності, яку генерують сонячні панелі, а інвертор струму перетворює його в змінний і передає в промислову мережу. Необхідно відзначити, що

система керування, для різних завдань, вимірює напругу на накопичувальному конденсаторі.

**Аварійні ситуації.** До ситуацій близьких до аварійних належать: раптове зникнення мережі, вихід з ладу напівпровідникового приладу, коротке замикання і т.п.

Аварійним станом для перетворювачів, що працюють в режимі джерела струму, підвищуючих ШПП та інверторів струму, є підвищення рівня вихідної напруги вище допустимого (заданого). Простим рішенням цієї проблеми є вимкнення ШПП.

Таку проблему як вихід з ладу одного з підвищуючих ШПП в результаті, наприклад, пробою транзистора або відсутності енергії від однієї з сонячних панелей, система керування визначить, відключивши по черзі ШПП і за напругою на конденсаторі НК легко вирахе аварійний ШПП.

А ось на зникнення мережі в системі керування повинен бути передбачений алгоритм безаварійного виходу. Сигналом служить відсутність синхронізації з мережею. Для цього система керування повинна контролювати тривалість імпульсів синхронізації і при невідповідності заданій - миттєво відключити інвертор і ШПП, а при появі імпульсів синхронізації - відновлювати роботу. Інвертор повинен мати захист від перевищення напруги в мережі як апаратний, так і програмний. Транзистори інвертора захищаються стабілітронами - супресорами (апаратно), розрахованими на прийом енергії перенапруги на час спрацювання програмного захисту. Транзистори ШПП повинні бути вибрані на допустимо задану напругу, а транзистори інвертора - на подвійну допустимо задану напругу.

Коротке замикання і вихід з ладу напівпровідникового приладу неможливо ліквідувати програмно, тому врятувати становище може тільки запобіжник в ланцюзі мережі, а далі - згідно алгоритму раптового зникнення мережі. Вибір цього запобіжника здійснюється за типовими методиками [10].

**Фізичний експеримент.** Структура фізичної моделі перетворювальної частини сонячної станції зображена на рис. 5 і виконана у відповідності зі структурами, наведеними на рис. 2 та рис. 3.

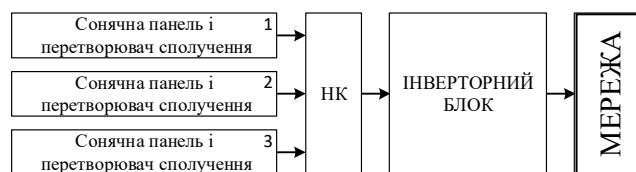


Рис. 5 Структурна схема перетворювальної частини

У фізичному експерименті використовувалися три сонячні панелі АКМ-30 [11], основні електричні характеристики яких наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні електричні характеристики сонячної панелі АКМ-30

Максимальна напруга (xx), В	Струм короткого замикання (кз), А	Напруга в точці максимальної потужності, В	Струм в точці максимальної потужності, А
22,3	1,73	18,6	1,62

Напруга на виході підвищуючого ШПП, а це напруга на накопичувальному конденсаторі (НК), повинна бути на ~10% більша за вхідну, яка є напругою в точці максимальної потужності сонячних панелей:

$$U_{НК} = 1,1 * U_{MP},$$

$$U_{НК} = 1,1 * 18,6 = 20,3 \text{ В.}$$

Але напруга на накопичувальному конденсаторі (НК) не може бути нижчою максимальної напруги холостого ходу сонячної панелі рівної 22,3 В, тому що при відключеному ШПП напруга на НК все одно буде рівна максимальній напрузі холостого ходу панелі. Тому допустимо задану напругу прийнято 22,3 В.

Вибір основних активних компонентів перетворювальної частини сонячної станції спрямовано на бюджетні прилади.

Польові транзистори обрані з низьким опором каналу:

- для ШПП сонячних панелей обраний IRFR4105PBF з опором каналу  $R_{DS(on)}=45$  мОм на напругу 55 В;

- для понижуючого ШПП та інвертора - IRF2807PBF з опором каналу  $R_{DS(on)}=13$  мОм на напругу 75 В.

Оціночні статичні втрати на основних елементах перетворювальної частини сонячної станції склали 9 Вт. При цьому втрати у діоді понижуючого ШПП дорівнюють 1,9 Вт, а втрати у діодах інвертора дорівнюють 3,8 Вт (на фізичному макеті найбільш нагріті саме діоди інвертора (~50°C)(всі діоди Шоттки)). При цьому ККД перетворювальної частини сонячної станції склав ~90 %.

Для фізичного моделювання використовувався серійний трансформатор ТС-100, втрати якого близько 10%, що істотно знижує загальний ККД системи.

Структурну схему станції можливо спростити. Для цього можна виключити узгоджуючі перетворювачі між сонячною панеллю та накопичувальним конденсатором (використовувати метод - Percentage of open circuit voltage [12]). Однак це дещо знизить відбір сонячної енергії, що підтверджено на фізичній моделі. Ще більше знизити собівартість станції можливо, якщо використовувати шість сонячних панелей, з'єднавши їх попарно-паралельно-последовно. При цьому напруга в ланці постійного струму збільшиться в два рази, що дозволить в інверторі струму, що працює на низькій частоті, використовувати більш дешеві в порівнянні з польовими транзисторами, біполярні транзистори Дарлінгтона (також виключити драйвер керування польовими транзисторами, а керувати безпосередньо від мікроконтролера), і внаслідок цього дещо підвищити ККД (приблизно на 3 %).

**Висновки.**

1. На основі розглянутих сучасних концепцій побудови сонячної електростанції запропоновано варіант перетворювача постійної напруги від сонячних панелей у змінну напругу промислової частоти.

2. Виконана фізична модель перетворювальної частини сонячної станції, яка підтвердила ефективність запропонованих у роботі технічних рішень.

3. Основні втрати перетворювальної частини сонячної станції виділяються у діодах (~ 5 Вт), що цілком пояснюється низькою напругою живлення (12В). Це підтверджується і фізичним експериментом.

4. Запропоновано варіант зниження собівартості сонячної станції, якщо виключити погоджуючі перетворювачі, а функцію "стеження за точкою максимальної потужності" покласти на ШПП інвертора.

**Список літератури**

1. <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42672.pdf>
2. <https://220volt.com.ua/avtonomnaya-solnechnaya-stantsiya-na-1kvt>
3. <https://www.olx.ua/obyavlenie/solnechnoe-derevo-solnechnye-batarei-paneli-inventory-elektrostantsii-IDCd1M6.html>
4. <http://sunalt.ru/stati/poleznoe-kak-ten-vliyaet-na-rabotu-solnechnoj-paneli.html>
5. <https://www.solar-battery.com.ua/kak-vyibrat-kontroller-zaryada/>
6. <http://solarsoul.net/vliyanie-teni-na-rabotu-solnechnyx-batarej>
7. <https://axiomplus.com.ua/solnechnyie-elektrostantsii/product-74695/>
8. Автономные инверторы. Ю. П. Гончаров, В. В. Ермуратский, Э. И. Заика, А. Ю. Штейнберг Кишинев: Штиинца, 1974. - 336 с.
9. [http://masters.donntu.org/2007/fema/rudenko\\_y/library/art7/](http://masters.donntu.org/2007/fema/rudenko_y/library/art7/)

- invert.htm
10. [http://www.eti.su/articles/nizkovoltnaya-tehnika/nizkovoltnaya-tehnika\\_1443.html](http://www.eti.su/articles/nizkovoltnaya-tehnika/nizkovoltnaya-tehnika_1443.html)
  11. [https://avante.com.ua/catalog/batareja\\_solnechnaja\\_akm\\_30\\_m\\_30\\_vt\\_12v\\_mono-06958/](https://avante.com.ua/catalog/batareja_solnechnaja_akm_30_m_30_vt_12v_mono-06958/)
  12. Desing and Analysis of Open Circuit Voltage Based Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System International of Advances in Science and Technology, Vol. 2, No. 2, 2011.

**References (transliterated)**

1. <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42672.pdf>
2. <https://220volt.com.ua/avtonomnaya-solnechnaya-stantsiya-na-1kvt>
3. <https://www.olx.ua/obyavlenie/solnechnoe-derevo-solnechnye-batarei-paneli-inventory-elektrostantsii-IDCd1M6.html>
4. <http://sunalt.ru/stati/poleznoe-kak-ten-vliyaet-na-rabotu-solnechnoj-paneli.html>
5. <https://www.solar-battery.com.ua/kak-vyibrat-kontroller-zaryada/>
6. <http://solarsoul.net/vliyanie-teni-na-rabotu-solnechnyx-batarej>
7. <https://axiomplus.com.ua/solnechnyie-elektrostantsii/product-74695/>
8. Avtonomni inventory. YU. P. Honcharov, V. V. Ermurat-skiy, E. I. Zayika, A. YU. Shteynberh Kyshyniv: Shtyynsa, 1974. - 336 s.
9. [http://masters.donntu.org/2007/fema/rudenko\\_y/library/art7/invert.htm](http://masters.donntu.org/2007/fema/rudenko_y/library/art7/invert.htm)
10. [http://www.eti.su/articles/nizkovoltnaya-tehnika/nizkovoltnaya-tehnika\\_1443.html](http://www.eti.su/articles/nizkovoltnaya-tehnika/nizkovoltnaya-tehnika_1443.html)
11. [https://avante.com.ua/catalog/batareja\\_solnechnaja\\_akm\\_30\\_m\\_30\\_vt\\_12v\\_mono-06958/](https://avante.com.ua/catalog/batareja_solnechnaja_akm_30_m_30_vt_12v_mono-06958/)
12. Desing and Analysis of Open Circuit Voltage Based Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System International of Advances in Science and Technology, Vol. 2, No. 2, 2011 roku.

Надійшла (received) 15.02.2019

**Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors**

**Кривошеєв Сергій Юрійович (Кривошеев Сергей Юрьевич, Kryvosheiev Serhii Yuryevich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7393-6198>; e-mail: [s.k.kryvosheev@gmail.com](mailto:s.k.kryvosheev@gmail.com)

**Варв'янська Вікторія Віталіївна (Варвянская Виктория Витальевна, Varvianska Viktoriia Vitaliivna)**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; e-mail: [tvita62@gmail.com](mailto:tvita62@gmail.com)

**Ересько Олександр Вячеславович (Ересько Александр Вячеславович, Eresko Oleksandr Viacheslavovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; e-mail: [aerkoff@gmail.com](mailto:aerkoff@gmail.com)

**Чепелюк Олександр Олександрович (Чепелюк Александр Александрович, Chepelyuk Oleksandr Oleksandrovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9821>; e-mail: [chep1@i.ua](mailto:chep1@i.ua)

**Давиденко Олександр Олександрович (Давиденко Александр Александрович, Davydenko Oleksandr Oleksandrovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; e-mail: [alexdavidenko02@gmail.com](mailto:alexdavidenko02@gmail.com)