

# ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ АВТОНОМНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

КПІ ім. Ігоря Сікорського

## **Анотація**

*Розглянуто проблеми водопостачання у світі. Наведено системи електроприводів, які застосовуються в сучасних автономних фотоелектричних насосних станціях та їх алгоритми керування. Розроблено функціональну схему енергоефективної автономної фотоелектричної насосної станції на основі використання та спільної оптимізації систем головного електроприводу насосу та системи керування положенням фотопанелей.*

**Ключові слова:** автономна, фотоелектрична, вода, насос, станція, електропривод, взаємозв'язаний, алгоритм, керування.

## **Abstract**

The problems of water supply in the world are considered. The systems of electric drives used in modern autonomous photovoltaic pump stations and their control algorithms are given. The functional scheme of an energy-efficient stand-alone photovoltaic pumping station based on use and joint optimization systems of the main electric drive of the pump and the system of the positioning of the photo panels has been developed.

**Keywords:** stand-alone, photovoltaic, water, pump, station, electric drive, interconnected, algorithm, control.

## **Вступ**

Одною із головних потреб людства є вода. Більшість людських видів діяльності покладаються на вільний доступ до відповідних запасів води для забезпечення виробництва продуктів харчування, побутових потреб, охорони здоров'я, вироблення електроенергії та відновлення екосистеми. Усе суспільство потребує воду для сталого соціального та економічного розвитку [1].

Водопостачання протягом всієї історії було актуальним технічним завданням. Існує велика та нагальна потреба у стабільному забезпечення водою в бідних, посушливих, сільських регіонах. Автономні системи генерації електроенергії та системи водопостачання на їх основі є оптимальним рішенням цієї проблеми в майбутньому.

Для зрошення сільськогосподарських культур, для перекачування води, яка використовується для побутового використання, а також для водопою худоби потрібна насосна система з відповідним джерелом живлення. У сільських районах джерела енергії можуть знаходитися на довгій відстані від джерел води. В той же час монтаж нових ліній електропередачі та трансформаторів в ізольованих місцях є надзвичайно дорогим. На даний час існує багато джерел електроенергії на основі двигунів внутрішнього згоряння, які використовуються в тому числі і для автономних систем насосного водопостачання. Такі системи характеризуються рядом переваг: портативність та простота установки, незалежність від наявності інфраструктури, але мають і недоліки, а саме: потреба обслуговування та дозакправки, висока вартість пального, негативний вплив на навколишнє середовище. Тому використання відновлюваної енергії є особливо привабливим для автономних систем перекачування води у сільській ту пустельній місцевості багатьох країн.

Генерування електричної енергії за допомогою фотоелементів є саме таким відновлювальним джерелом, перевагами якого для систем водопостачання є: відносна легкість, низькі інфраструктурні вимоги, стабільність, безшумність через відсутність обертових машин та турбін, можливість застосування безпосередньо в місці використання; простота монтажу, невелике регулярне обслуговування [2].

Використання автономних фотоелектричних водяних насосних систем має сприяти покращенню умов життя у віддалених районах та підтриманню чистоти навколишнього середовища.

### Результати досліджень

Фотоелектрична система складається з взаємопов'язаних компонентів, розроблених таким чином, щоб досягти конкретної мети доставки бажаної кількості та якості електроенергії від джерела до навантаження. Фотоелектричні системи класифікуються за способом підключення до мережі на автономні та гібридні. Останні включають різні джерела енергії, такі як фотобатареї, дизельні генератори та вітрогенератори. У автономних та підключених до мережі відновлюваних джерелах енергії можуть бути використані елементи зберігання, такі як батареї або суперконденсатори, щоб накопичувати енергію в денний час, коли сонячна радіація максимальна.

Автономні системи вважаються одними з найбільш раціональних для впровадження фотоелектричних станцій, особливо в сільських та віддалених місцевостях, де мають місце великі періоди інтенсивного сонячного випромінювання та відсутній доступ до основної електромережі. Прикладами є системи зв'язку, водонасосні системи, маяки, аварійні служби та військові об'єкти.

Автономна фотоелектрична система водопостачання привертає все більше уваги за останні 20 років через значні постійні скорочення витрат, досягнуті у виробництві фотопанелей. У фотоелектричних системах широко застосовуються два типи насосів: відцентровий насос і об'ємний насос. Відцентровий насос здатний перекачувати великий об'єм води і працює з відносно високим ККД. Ці насоси використовуються для перекачування води із свердловин та з поверхневих водойм і вони підходять для середніх та високих потреб води. Об'ємні насоси зазвичай використовуються при низьких витратах. Відцентрові насоси, на відміну від об'ємних, мають експлуатаційні характеристики, які добре узгоджуються властивостям фотопанелей, оскільки їх струм змінюється майже лінійно залежно від сонячного випромінювання [3].

Енергія від сонячних панелей отримується у формі ЕРС постійного струму, що повільно змінюється, тому насоси зазвичай приводяться в дію двигунами постійного струму, щоб мінімізувати складність системи, оскільки вони можуть бути безпосередньо підключені до масиву панелей. Двигуни постійного струму з постійними магнітами (ПМ) не потребують початкового збудження і є більш популярними, ніж двигуни з електромагнітним збудженням. Недоліком щіткових двигунів є те, що вони вимагають технічного обслуговування через знос та засмічення комутатора та ковзних контактів. Безщіткові двигуни постійного струму все частіше використовуються в фотоелектричних насосних системах, оскільки вони мають відносно високий ККД і не вимагають обслуговування, але вартість і складність таких систем будуть значно вищими.

Двигуни змінного струму мають переваги, такі як висока ефективність, відсутність щіток, більш проста та міцна конструкція. Початкова вартість може бути найнижчою у випадку з асинхронним двигуном. Однак детальний аналіз двигунів постійного та змінного струму, що застосовуються для водопостачання, проведений в [4], показав, що ефективність і динамічні характеристики двигуна постійного струму з ПМ кращі, ніж асинхронного двигуна. Крім того, при використанні двигуна змінного струму потрібен інвертор для перетворення постійного струму фотопанелей в змінний струм. Отже, вартість та складність загальної системи значно збільшуються.

Хоча фотоелектричні панелі можуть здаватися хорошим джерелом електроенергії, їх здатність перетворювати енергію сонячного світла в електричну енергію порівняно недосконало і лежить в межах 12 ~ 20%. Діапазон ефективності може ще більше знизитися під час зміни сонячного опромінення, температури панелі та умов навантаження. Тому важливо керувати фотоелементами масиву в точці максимальної потужності (МРР) або якомога ближче до неї, використовуючи електронну схему відповідності навантаженню, оскільки це дає можливість покращення вихідної потужності порівняно з прямим підключенням навантаження [5]. Крім того, вихідна потужність коливається зі зміною температури навколишнього середовища та сонячного опромінення. Тому робоча точка більшості насосних систем з двигунами постійного струму при різних рівнях сонячного випромінювання була б далекою від МРР. Задача слідкування за МРР з різними умовами джерела та навантаження вирішується

формуванням нелінійної зовнішньої характеристики фотопанелі. Загальна вартість системи може бути зменшена, а ефективність роботи та потужність на виході збільшені, якщо сонячна панель постійно позиціонується для отримання максимальної кількості енергії протягом денного часу. З цією метою може бути використаний допоміжний слідкуючий електропривод сонячної панелі, який налаштовується на пошук екстремуму і керується датчиком сонячного випромінювання.

Отримання максимальної потужності для головного електроприводу автономної насосної фотоелектростанції забезпечується взаємозв'язаною системою електроприводів позиціонування фотоелектричної панелі та електронною системою відстеження максимальної потужності (MPPT). Система MPPT складається з перетворювача потужності, розташованого між джерелом (панеллю) та навантаженням, а коефіцієнт зарядності перетворювача регулюється алгоритмом управління для забезпечення відстеження MPP [6].

Останніми роками для систем електроживлення з фотопанелями запропоновано кілька алгоритмів MPPT. Алгоритми MPPT можуть бути розділені на два типи, з непрямим керуванням або «технікою квазі відстеження» та прямим керуванням або «справжніми методами відстеження» [7]. У методах непрямого керування MPP обчислюється шляхом вимірювання напруги та струму сонячної інсоляції, або за допомогою використання математичних функцій, отриманих з емпіричних даних. Отже, ці методи не здатні відстежувати MPP з різним опроміненням і температурою. Методами непрямого керування є методика пошуку функціональних залежностей (таблиць), техніка постійної напруги, дробова напруга відкритого контуру та дробовий струм короткого замикання. Справжні методи відстеження мають можливість знаходити оптимальну робочу точку навіть у мінливих атмосферних умовах, оскільки вони не покладаються на попередні знання, або обчислені дані з характеристик панелі. Справжніми методами відстеження є техніка збурень та спостережень, техніка нарощення провідності [7]. До цієї категорії також можуть бути включені методи штучного інтелекту, такі як методи нечіткого логічного управління та методи нейронної мережі. У процесі відстеження використовується одна або дві змінні для обчислення MPP. Для дробової напруги відкритого контуру та струму дробового короткого замикання використовується лише одна змінна, або вихідна напруга панелі, або струм відповідно, хоча методи логічного керування та штучного інтелекту потребують обох змінних для визначення MPP.

Одним із таких методів є метод постійної напруги (див. рис 1). Якщо фотоелектростанція реалізована без акумулятора для прив'язки напруги шини до приблизно постійного рівня, може застосовуватися система стабілізації постійної напруги. В такій системі автоматичного регулювання зворотний зв'язок по напрузі фотопанелі порівнюється з фіксованою опорною напругою і отриманий сигнал регулює коефіцієнт передачі перетворювача DC-DC для збереження робочої точки масиву на MPP або близько до нього [8].

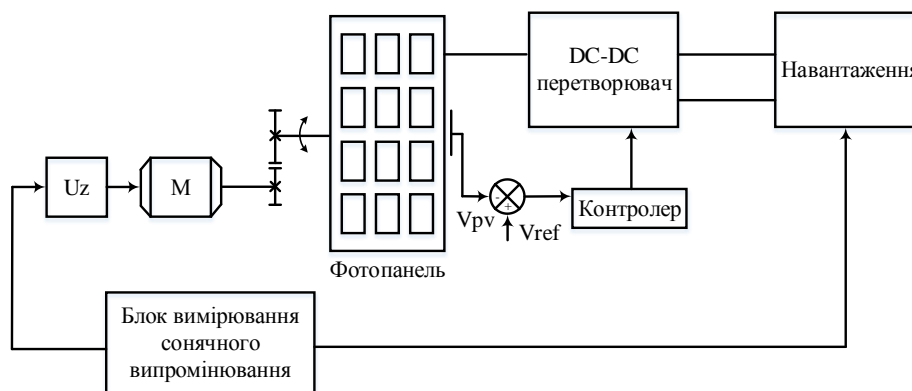


Рисунок 1 – Функціональна схема системи керування фотоелектричної станції за методом постійної напруги

З метою підвищення ефективності фотоелектричної насосної станції пропонується додати до системи MPPT, яка здійснює оптимізацію режимів роботи головного електроприводу насосу, адаптивну систему

керування положенням фотопанелі. Функціональна схема системи взаємозв'язаних електроприводів автономної насосної фотоелектричної станції наведена на рис. 2. Дана система складається з сонячної фотопанелі, слідкуючого електроприводу положення панелі М, перетворювача DC-DC, трифазного інвертора напруги, а також синхронного двигуна з постійними магнітами PMSM, поєднаного з водяним насосом.

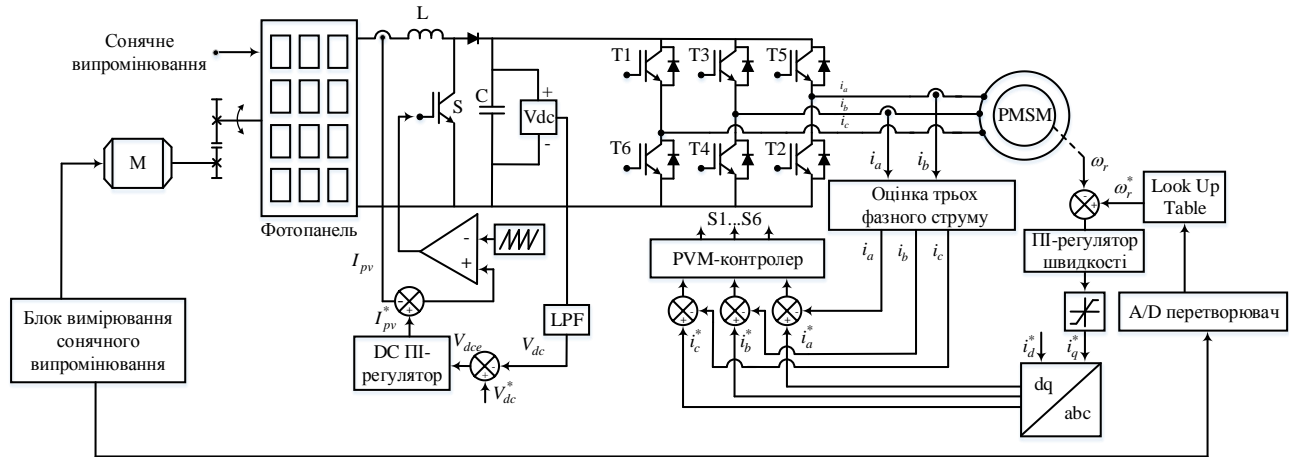


Рисунок 2 – Схема взаємозв'язаних електроприводів автономної фотоелектричної насосної станції

Основним компонентом фотоелектричної системи є фотопанель, яка утворюється з індивідуальних фотоелементів, з'єднаних між собою паралельно і послідовно для підвищення вихідної напруги та потужності. Масив фотоелементів підключений до перетворювача напруги постійного струму DC-DC, задачею якого є збільшення рівня і стабілізація вихідної напруги. Перетворення постійного струму в змінний для живлення PMSM здійснюється інвертором напруги, який складається з транзисторів T1–T6 на основі IGBT. Забезпечення максимальної віддачі енергії фотопанеллю здійснюється допоміжним слідкуючим електроприводом М, налаштованим на пошук екстремуму сонячного випромінювання.

Система MPPT управління головним електроприводом складається з двох частин, перша – управління підсилювачем для підтримання постійної напруги в ланці постійного струму, друга – для керування інвертором у векторноорієнтованому режимі для врахування зміни сонячного випромінювання, а також умов навантаження [8]. Головні складові алгоритму керування наступні:

1) керування підсилювачем. Напруга ланки постійного струму і вихідна напруги з ПІ-регулятора застосовується для визначення похибки напруги постійного струму. Дана похибка використовується для генерації сигналів комутації IGBT ключа S, що знаходиться в ланці постійного струму;

2) керування інвертором. Застосовується схема вектор-орієнтованого управління. Два давачі струму використовуються для визначення струмів у фазах двигуна  $I_a, I_b, I_c$ . Завдання швидкості двигуна здійснюється у функції сонячного опромінення з метою відстеження максимальної потужності. Блок вимірювання сонячного випромінювання (датчик опромінення) видає на виході сигнал напруги, який надходить до оглядової таблиці (Look Up Table). Задану швидкість порівнюють з виміряною швидкістю обертання ротора для знаходження похибки по швидкості. Похибка швидкості обробляється за допомогою ПІ-регулятора швидкості, який забезпечує опорний електромагнітний крутний момент, який використовується для генерації заданих складових струму  $I_q^*$  та  $I_d^*$ ;

3) Оцінку тьохфазних струмів  $I_a^*, I_b^*, I_c^*$  знаходять за допомогою кутового положення ротора, після чого ці розрахункові струми порівнюються з фактичними струмами  $I_a, I_b, I_c$ , а отримані похибки подаються на контролер PVM струму для генерації сигналів комутації ШІМ.

Завданням подальших досліджень є аналіз роботи електромеханічної системи фотоелектричної станції та розробка алгоритмів керування нею, як єдиного технологічного комплексу, з урахуванням взаємозв'язків головного та допоміжного електроприводів, а також особливостей об'єкту керування.

### Висновки

Наведено актуальні проблеми водопостачання у світі. Розглянуто системи електроприводів, які використовуються в автономних фотоелектричних насосних станціях, обрано найбільш раціональну систему електроприводу та алгоритми керування нею. Запропоновано новий підхід до побудови системи керування фотоелектричної станції на основі використання та спільної оптимізації систем головного електроприводу насосу та системи керування положенням фотопанелі.

На основі удосконаленого алгоритму керування потужністю побудовано функціональну схему енергоефективної автономної фотоелектричної насосної станції.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Khaligh and O.C. Onar, *Energy harvesting solar, wind, and ocean energy conversion systems*, CRC Press, New York, 2010.
2. J.M. Shen, H.L. Jou and J.C. Wu, "Novel transformer less grid connected power converter with negative grounding for photovoltaic generation system", *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 27, no. 4, pp. 1818-1829, Apr. 2012.
3. H. Moussa, M. Fadel and H. Kanaan, "A single-stage DC-AC boost topology and control for solar PV systems supplying a PMSM", in *Proc REDEC Conf.*, Nov. 2012, pp. 1-7.
4. R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, CRC Press, New York, 2010.
5. B.A. Essalam and K. Mabrouk, "Grid-Connected Modeling, Control and simulation of single phase two-level photovoltaic power generation system coupled to a permanent magnet synchronous," *Proc. IEEE WOSSPA Workshop*, May 2011, pp. 29-34.
6. F. Mayssa, F. Ayman and S. Lassaad, "Influence of photovoltaic DC bus voltage on the high speed PMSM drive", *Proc. IEEE IECON Conf.*, Oct. 2012, pp. 4489 - 4494.
7. B.N. Singh, P. Rastgoufard, B. Singh, A. Chandra, and K. Al-Haddad, "Design, simulation and implementation of three-pole/four-pole topologies for active filters", *Proc. IEE, Elect. Power Appl.*, vol. 151, no. 4, pp. 467-476, Jul. 2004.
8. M. Dubey, S. Sharma, R. Saxena, "Solar PV Stand-Alone Water Pumping System Employing PMSM Drive", *IEEE Student's Conference on Electrical, Electronics and Computer Science SCECS* 2014.

**Теряєв Віталій Іванович** — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, e-mail: kprivit@gmail.com

**Федорос Юрій Михайлович** — студент групи ЕП-91мп, факультет електроенерготехніки та автоматики, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, e-mail: yura.fedoros@gmail.com

**Teriaiev Vitalii I.** — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Electromechanical System Automation and Electrical Drives, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv

**Fedoros Yyrii M.** — Faculty of Electric Power Engineering and Automatics, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, email: yura.fedoros@gmail.com