

УДК 621.472

## ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ В СИСТЕМІ З АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ ВОДЯНОГО НАСОСА У РАЗІ ЖИВЛЕННЯ ВІД ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

**В.О. Войтех**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680 Україна

e-mail: [vvoitekha@gmail.com](mailto:vvoitekha@gmail.com)

*Наведено структурну схему системи фотоелектричні панелі–спеціальний перетворювач частоти–асинхронний двигун–водяний насос, схему заміщення, рівняння та електричні характеристики фотоелектричної панелі, рівняння водяного насоса у разі керування частотою обертання, розроблено алгоритм керування перетворювачем частоти для максимального відбору потужності. Наведено характеристики асинхронних двигунів для різної кількості фотоелектричних панелей, а також фото дослідного зразка розробленого перетворювача частоти. Бібл. 6, рис. 5, таблиця.*

**Ключові слова:** перетворювач частоти, фотоелектрична панель, відновлювані джерела енергії, насос, асинхронний двигун, ККД.

Особливістю відновлюваних джерел енергії є залежність їх вихідних параметрів (струму, напруги) від зовнішніх факторів (кількості та схеми з'єднання, освітлення, запиленості для фотоелектричних панелей). Проте більшість електричних приладів (у цьому випадку перетворювач частоти з асинхронним двигуном) вимагають стабільних параметрів мережі живлення, у першу чергу напруги. Для узгодження напруги використовують підвищуючий *dc-dc* перетворювач, що ускладнює систему, збільшує її вартість та знижує ККД [1]. Для забезпечення прямого підключення до відновлюваних джерел енергії без додаткового перетворювача необхідно розробити спеціальний перетворювач частоти та асинхронний двигун, які можуть працювати за напруг, що відрізняються від мережевих, забезпечуючи у цьому разі режим максимального відбору потужності (MPPT) від фотоелектричних панелей. На рис. 1 наведено характеристики стандартної фотоелектричної панелі у разі оптимального освітлення. На рис. 2 наведено структурну схему запропонованої системи фотоелектричні панелі–спеціальний перетворювач частоти–асинхронний двигун–водяний насос. Фотоелектричні панелі з'єднані між собою так, щоб забезпечити необхідну потужність та напругу для навантаження. У цьому разі завжди має відбуватися баланс потужності

$$P_{нас} = P_{пан} \cdot \eta_{нас} \cdot \eta_{пер} \cdot \eta_{дв}, \quad (1)$$

де  $P_{пан}$  – електрична потужність, генерована панелями;  $P_{нас}$  – потужність насоса;  $\eta_{нас}$ ,  $\eta_{дв}$ ,  $\eta_{пер}$  – ККД насоса, двигуна та перетворювача. На рис. 3 наведено еквівалентну схему заміщення PV-елемента фотоелектричної панелі.

PV-елемент характеризується двома основними параметрами: струмом короткого замикання  $I_{SC}$  та напругою холостого ходу  $V_0$ . Вихідний струм  $I = I_{sd} - I_d$ , де  $I_d$  – струм через діод. Підставляючи значення струму через діод, а також враховуючи з'єднання PV елементів у панель [2], отримуємо значення вихідного струму PV-панелі:

$$I = N_p I_{sd} - N_p I_d \left( e^{\frac{qV_d}{N_s K T}} - 1 \right), \quad (2)$$

де  $N_p$  та  $N_s$  – кількість елементів, з'єднаних паралельно та послідовно;  $q$  – заряд електрона;  $V_d$  – напруга на діоді;  $K$  – постійна Больцмана;  $T$  – температура. Для оптимізації відбору енергії від PV-панелі вона має працювати у режимі MPPT (рис. 1), що може бути забезпечено чотирма окремими (або їх комбінацією) методами: збурення і спостереження, зро-

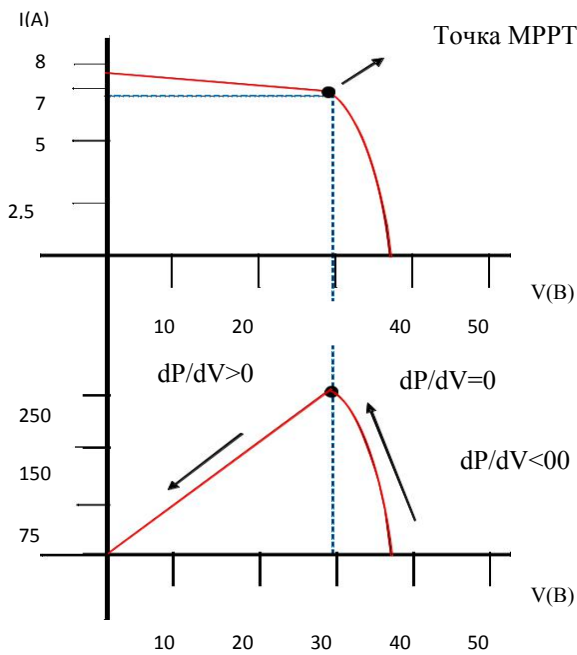


Рис. 1

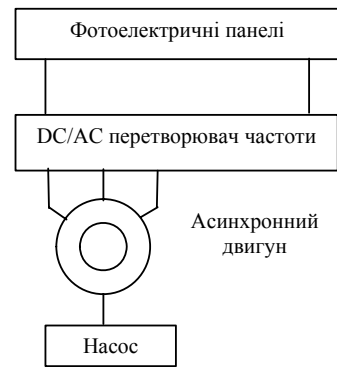


Рис. 2

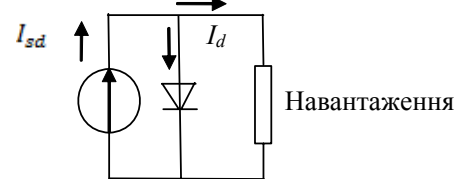


Рис. 3

стаючої провідності, струмової розгортки та постійної напруги. Найчастіше використовують збурення і спостереження, коли перетворювач на невелику величину змінює вхідний опір, внаслідок чого змінюється напруга сонячної установки і вимірюється потужність. Якщо потужність збільшується, контролер продовжує змінювати напругу в цьому ж напрямку, поки потужність не перестане збільшуватися або навпаки. Недоліком цього методу є можливі коливання потужності. Метод постійної напруги найбільш простий: вихідна напруга визначається відношенням поточної вихідної напруги до напруги холостого ходу. Перетворювач, що працює за цим методом, на мить відключає навантаження і заміряє напругу холостого ходу, після цього продовжує роботу з напругою, наприклад, 0,76 від отриманого значення [3]. Як правило, цей коефіцієнт визначається емпірично або на основі моделювання для очікуваних умов експлуатації. Цей метод значно простіший і не дає коливань потужності, але не забезпечує точний режим МРРТ. Тому для керування перетворювачем було обрано комбінацію алгоритмів збурення і спостереження та постійної напруги. На рис. 4 наведено алгоритм керування перетворювачем частоти системи рис. 2, де  $V$ ,  $I$ ,  $V_0$  – напруга, струм та напруга холостого ходу фотоелектричних панелей;  $F$  – частота на виході перетворювача. Алгоритм працює таким чином: вимірюються значення  $I, V, V_0$  на виході сонячної панелі та частота перетворювача, вираховується потужність та на невелике значення збільшується частота на виході перетворювача, а значить, і частота обертання двигуна та насоса, що призводить до збільшення потужності навантаження. У цьому разі знов вимірюються значення  $I, V$  на виході сонячної панелі, вираховується потужність, якщо вона збільшується, частота на виході перетворювача зростає, якщо зменшується, то зменшується й частота. Якщо у цьому разі починаються коливання частоти (потужності навантаження), перетворювач переходить у режим постійної напруги доти, поки не зникнуть коливання частоти.

Для розрахунку необхідної кількості фотоелектричних панелей згідно з виразом (1) потрібно знати потужність насоса, а також ККД насоса, перетворювача частоти та двигуна. Характеристика відцентрового насоса може бути апроксимована квадратичною формою за допомогою моделі [4]:  $H = a_0\omega^2 + a_1\omega Q + a_2Q^2$ , де  $H$  – напір;  $Q$  – потік, швидкість двигуна

$\omega$  виражається як  $\omega = \left(1 - \frac{\omega_{sl}}{\omega_s}\right)$ , де  $\omega_s$  – кутова частота;  $\omega_{sl}$  – частота ковзання;  $a_0, a_1, a_2$  –

є константами залежно від розмірів насоса. ККД насоса визначається як відношення гідравлічної потужності, що надходить від насоса до рідини, до механічної потужності вала:

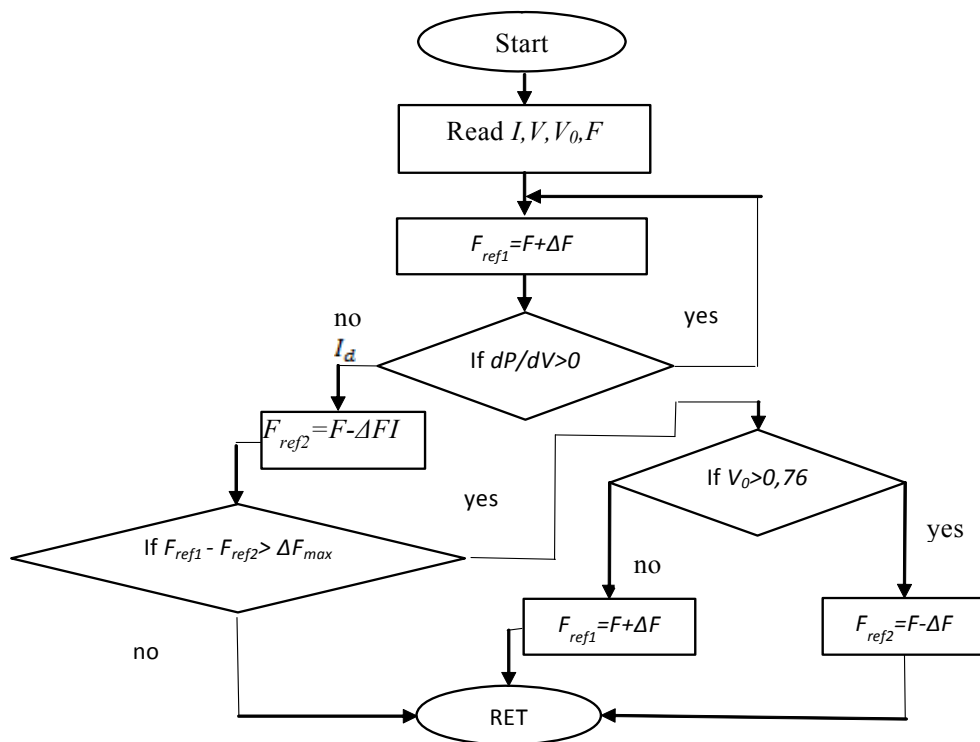


Рис. 4

$\eta_{нас} = \rho g H Q / \left( c \left( 1 - \frac{\omega_{sl}}{\omega_s} \right)^3 \omega_s^3 \right)$ , де  $c$  – коефіцієнт, що залежить від конструкції насоса та тер-

тя. ККД перетворювача частоти зазвичай приймається рівним 0,95...0,98, ККД асинхронного двигуна залежить від частоти та навантаження. Так, для двигуна 2,2 кВт у разі регулювання частоти від 25 до 50 Гц і навантаження від 50 до 100 % від номінального ККД змінюється від 0,60 до 0,85 [5]. У таблиці наведено характеристики спеціальних двигунів (Franclin Electric) занурювальних насосів та розрахованих відповідних систем фотоелектричних панелей [6].

Потужність двигуна, Вт	Номінальна напруга за частотою 50 Гц, В	Номінальний струм, А	cos φ	ККД	n ном, об/хв	Вхідна потужність, Вт	Кількість фото-панелей	Макс. струм МРРТ, А	Напруга, В	Потужність генерації макс, Вт
750	100	6,8	0,85	74	2808	1010	4-6	7	128-192	896-1344
1100	200	5,0	0,83	76	2830	1447	6-8	7	192-256	1344-1792
1500	230	5,7	0,76	64	2830	2343	8-10	7	256-320	1792-2240

На основі наведених даних та розроблених алгоритмів було створено програмне забезпечення та виготовлено перетворювач частоти для керування занурювальним водяним насосом у разі живлення від відновлюваних джерел енергії. На рис. 5 показано дослідний зразок такого перетворювача, розрахованого на потужність двигуна до 1,5 кВт.

Випробування на стенді підтвердили відповідність його характеристик розрахованим, наведеним у таблиці.

**Висновки.** 1. Для живлення водяного насоса від фотоелектричних панелей без застосування підвищувачого  $dc/dc$  перетворювача, що збільшує надійність та ККД, а також знижує загальну вартість системи, необхідна



Рис. 5

розробка спеціального перетворювача частоти.

2. Розроблений перетворювач може бути використано у автономних системах водопостачання у сільському господарстві на півдні України та у країнах Азії й Африки, де немає централізованого електропостачання.

1. Caracus J., Freitas G. Implementation of a high efficiency, high life-time and low cost converter for an autonomous photovoltaic water pumping system. *IEEE Transaction on industrial applications*. 2014. Vol. 1. Pp. 631–641.
2. Buresch M. Photovoltaic energy systems, McGraw-Hill, New York, 1983.
3. Rebei N., Gammoudi R., Hmidet A., Hasnaoui O. Experimental implementation technique soft mppt algorithm for pv pumping system. *IEEE 11th International Multi-Conference on Signal Systems & Devices*. 2014. Pp. 251–255.
4. Kalasathya S., Sathish Khanna P. Implementation of solar power ac motor pump set on mppt with battery backup for agriculture system. *International journal of engineering and computer science ISSN*. 2016. 2. Vol. 5. Pp. 18928–18933.
5. Burt C., Piao X., Gaudi F., Busch B. Electric motor efficiency under varying frequencies and loads. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 2009. Pp. 129–136
6. Войтех В.О. Енергетичні комірки для відновлюваних джерел енергії. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип. 44. С. 29–34.

УДК 621.472

**В.А. Войтех**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680 Україна

#### **ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ В СИСТЕМЕ С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ВОДЯНОГО НАСОСА ПРИ ПИТАНИИ ОТ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

Приведены структурная схема системы фотоэлектрические панели–специальный преобразователь частоты–асинхронный двигатель–водяной насос, схема замещения, уравнения и электрические характеристики фотоэлектрической панели, уравнения водяного насоса при регулировании частоты вращения, разработан алгоритм регулирования преобразователя частоты для максимального отбора мощности. Приведены характеристики асинхронных двигателей для разного числа фотоэлектрических панелей, а также фото экспериментального образца разработанного преобразователя частоты. Библ. 6, рис. 5, таблица.

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, фотоэлектрическая панель, возобновляемые источники энергии, насос, асинхронный двигатель, КПД.

**V.O.Voitek**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

#### **THE FREQUENCY CONVERTER IN THE INDUCTION MOTOR WATER PUMP SYSTEM WITH FEEDING FROM RENEWABLE ENERGY SOURCES**

A block diagram of the photovoltaic panels–special frequency converter–induction motor–water pump system, equivalent circuit, equations and photovoltaic panel electrical characteristics, speed control water pump equations are given. Frequency converter control algorithm for maximum power take-off is developed, induction motors characteristics for different numbers of photovoltaic panels, as well as a developed inverter experimental model photo are given. References 6, figures 5, table.

**Key words:** frequency converter, photovoltaic panel, renewable energy sources, pump, asynchronous motor, efficiency.

1. Caracus J., Freitas G. Implementation of a high efficiency, high life-time and low cost converter for an autonomous photovoltaic water pumping system. *IEEE Transaction on industrial applications*. 2014. Vol. 1. Pp. 631–641.
2. Buresch M. Photovoltaic energy systems, McGraw-Hill, New York, 1983.
3. Rebei N., Gammoudi R., Hmidet A., Hasnaoui O. Experimental implementation technique soft mppt algorithm for pv pumping system. *IEEE 11th International Multi-Conference on Signal Systems & Devices*. May 2014. Pp. 251–255.
4. Kalasathya S., Sathish Khanna P. Implementation of solar power ac motor pump set on MPPT with battery backup for agriculture system. *International journal of engineering and computer science ISSN*. 2016. 2. Vol. 5. Pp. 18928–18933.
5. Burt C., Piao X., Gaudi F., Busch B. Electric motor efficiency under varying frequencies and loads. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 2009. Pp. 129–136.
6. Voitek V.O. Energy cells for renewable energy. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2016. Vyp. 44. Pp. 29–34. (Ukr)

Надійшла 18.10.2018

Received 18.10.2018