

7. *Active Magnetic Shielding* (Field Cancellation). [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.emfservices.com/afcs.html>.
8. Celozzi S. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization / S. Celozzi, F. Garzia // IEE Proc. Sci. Meas. Technol. – Rome, Italy, Jan. 2004. – Vol. 151. № 1. – P. 2–7.
9. Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line // HAIT Journal of Science and Engineering. – 2005. – № 2. – P. 254–265.

УДК 621.3.01

**В.І. Кузнецов<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **Т.Б. Нікітіна<sup>2</sup>**, докт. техн. наук, **І.В. Бовдуй<sup>3</sup>**, канд. техн. наук, **О.В. Волошко<sup>4</sup>**, канд. техн. наук, **О.В. Вініченко<sup>5</sup>**, канд. техн. наук

1, 3–5 – Інститут технічних проблем магнетизму НАН України,  
вул. Індустріальна, 19, Харків, 61106, Україна

2 – Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
вул. Петровського, 25, Харків, 61002, Україна

**Експериментальні дослідження макета замкненої системи активного екранування магнітного поля трифазної лінії електропередачі**

*Проведено експериментальну верифікацію методу синтезу замкнених систем активного екранування магнітного поля на розробленому макеті трифазної одноланцюгової повітряної лінії електропередачі, яка створює обертове поле з найбільш складною просторово-часовою структурою. Експериментально підтверджено можливість зменшення магнітної індукції до нормативного рівня для житлових приміщень. Бібл. 9, рис. 3.*

**Ключові слова:** трифазні одноланцюгові повітряні лінії електропередачі, магнітне поле промислової частоти, макет системи активного екранування, експериментальні дослідження.

**V.I. Kuznetsov<sup>1</sup>**, **T.B. Nikitina<sup>2</sup>**, **I.V. Bovdui<sup>3</sup>**, **A.V. Voloshko<sup>4</sup>**, **E.V. Vinichenko<sup>5</sup>**,

1, 3–5 – Institute of Technical Problems of Magnetism National Academy of Sciences of Ukraine,  
Industrialna st., 19, Kharkiv, 61106, Ukraine

2 – Kharkov National Automobile and Highway University,  
Petrovskoho st., 25, Kharkiv, 61002, Ukraine

**Experimental researches of active shielding closed-loop model system of magnetic field of three-phase transmission power line**

*The experimental verification of the method of synthesis of active screening closed loop system model of magnetic field created of the three-phase- single-circuit overhead transmission power line with rotation magnetic field with the most complex space-time structure and. Experimentally confirmed the possibility of reducing the level of the magnetic field to the standard level for premises. References 9, figures 3.*

**Key words:** three-phase single circuit transmission power line, power frequency magnetic field, active shielding system model, experimental researches.

Надійшла 03.02.2016

Остаточний варіант 23.06.2016

Received 03.02.2016

Accepted 23.06.2016

УДК 621.472

**ЕНЕРГЕТИЧНІ КОМІРКИ ДЛЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ**

**В.О. Войтех**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680 Україна  
e-mail: vvoitek@mail.ru

*Наведено особливості побудови автономних та мережевих фотоелектричних систем, розділення їх за потужностями та схемами підключення фотоелектричних панелей, запропоновано структуру та розрахункову схему енергетичної комірки, що дає змогу використовувати кількість панелей від 2 до 10 з забезпеченням необхідної якості вихідної напруги. Розроблено алгоритм керування коміркою для однопроцесорної схеми, що дає можливість забезпечити всі режими роботи комірки з необхідними параметрами вихідної напруги та зовнішнього зв'язку з центральним комп'ютером. Бібл. 4, рис. 5, таблиця.*

**Ключові слова:** енергетична комірка, фотоелектрична панель, інвертор, мікроконтролер, відновлювані джерела енергії, IGBT, алгоритм, математична модель, програмування, акумулятор.

Відновлювані джерела енергії на сучасному етапі інтенсивно розвиваються, і фотоелектричні панелі є важливою їх частиною. Фотоелектрична панель є досить складним пристроєм, який весь час змінює параметри (залежно від освітлення, нахилу, температури, запиленості і т.п.), тому потребує спеціальних перетворювачів, що адаптують енергію панелей у енергію загальної або автономної електричної мережі. Фотоелектричні системи можна розділити на автономні та мережеві. Автономні використовуються у випадках, коли немає загальної мережі (віддалені райони, острови або там, де часто зникає напруга загальної мережі). Мережеві системи використовуються значно частіше і працюють паралельно з традиційною електричною мережею тільки за наявності напруги. В обох випадках електричну енергію фотоелектричних панелей постійного струму інвертор перетворює на електричну з параметрами загальної мережі. Відмінність автономних систем полягає у алгоритмах керування інвертором та наявності накопичувача енергії – зазвичай акумулятора.

Оскільки вихідна напруга однієї фотоелектричної панелі відповідно до освітленості становить від 20 до 45 В постійного струму, для отримання високої мережевої напруги їх з'єднують послідовно у ланцюги (для однофазних інверторів 350 В – 12 шт., а для трифазних 600 В – 21 шт.) і використовують один інвертор. За потужності від 10 до 250 кВт встановлюють один трифазний інвертор і кілька рядків панелей у паралель (рис. 1 а) Така система називається “центральною” та використовується для потужних сонячних електростанцій. Інший варіант – один рядок панелей з одно- чи трифазним інвертором потужністю до 5 кВт (рис. 1 б). Така система називається “стрінговою” та використовується для приватних домогосподарств. Система, показана на рис. 1 а, має низьку вартість, одночасно вона менш надійна та менш ефективно використовує енергію фотоелектричних панелей у порівнянні з системою, показаною на рис. 1 б. У разі затемнення або виходу з ладу однієї панелі різко погіршується ефективність всієї системи, і для розв'язання цієї проблеми використовують так звані мікроінвертори, що встановлюються окремо для кожної фотоелектричної панелі та мають потужність до 250 Вт [2].

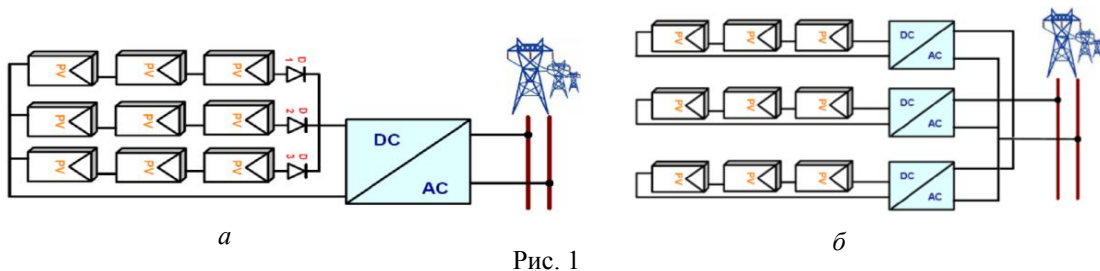


Рис. 1

Для отримання більшої потужності панелі з мікроінвертором з'єднують паралельно. Структурна схема системи з мікроінвертором зображена на рис. 2.

У цьому випадку завдяки імпульсному трансформатору постійна напруга панелі 20...45 В збільшується до 300...450 В, а потім IGBT інвертором перетворюється у змінну напругу з параметрами мережі. Вартість такого інвертора складає близько 200 USD, що значно перевищує вартість аналогічної за потужністю “центральної” або “стрінгової” системи. У багатьох випадках споживач прагне отримати проміжний варіант: із кількістю панелей від 2 до 10, де наведені вище технічні рішення не підходять, крім того поширення набули акумуляторні накопичувачі енергії [4], що дають змогу забезпечити роботу інверторів у нічний час, за піковими навантаженнями у енергосистемі або при аварійному зникненні загальної мережі. Таким чином, виникла необхідність створення енергетичної комірки з кількістю фотоелектричних панелей від 2 до 10, що поєднає переваги автономних та мережевих

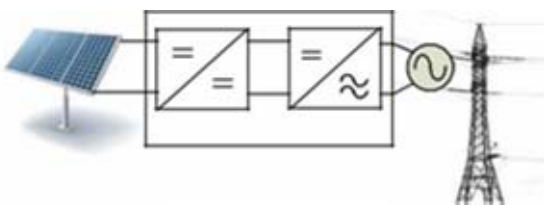


Рис. 2

інверторів. Структурна схема запропонованої енергетичної комірки показана на рис. 3, де позначено: 1 – фотоелектричні панелі; 2 – boost перетворювач із драйвером 3; 4 – пристрій керування зарядом-розрядом акумулятора; 5 – акумулятор; 6 – IGBT інвертор з драйвером 7; 8 – фільтр; 9 – мережа. Мікроконтролер здійснює ШІМ керування інвертором 6, boost перетворювачем 2, зарядом-розрядом акумулятора 5 та оптимізує відбір енергії від фотоелектричних панелей завдяки алгоритму MPPT. Тобто наведена енергетична комірка потужністю від 0,5 до 2,5 кВт може працювати як в автономному режимі, так і на електричну мережу, накопичувати енергію в акумуляторах і при потребі віддавати її у мережу, автоматично переходити з автономного у мережевий режим та працювати паралельно з іншими комірками. Разом з тим вартість енергетичної комірки приблизно у два рази менша аналогічної за потужністю системи з мікроінверторів, що з урахуванням більшої функціональності дає їй значні переваги. Для моделювання процесів у системі розроблено математичну модель у програмі MATLAB Simulink, показано на рис. 4.

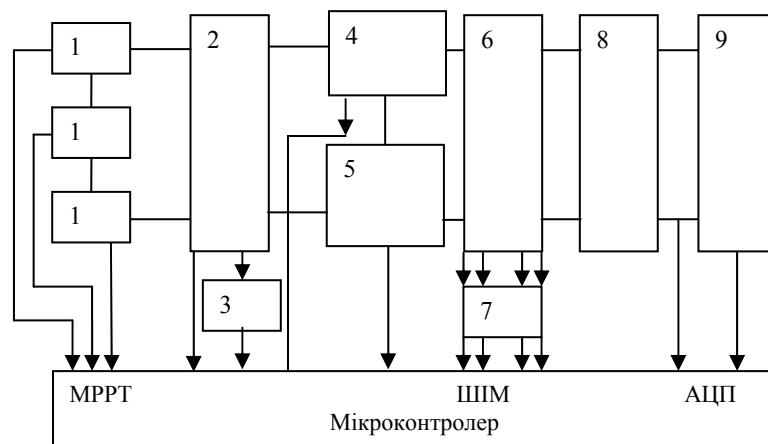


Рис. 3

Особливістю цієї схеми є алгоритм керування 2-boost перетворювачем. Він працює у режимі керованого джерела струму з урахуванням вимог MPPT, тобто оптимального струму для фотоелектричних панелей. Значення  $L_1$  та  $C_1$  розраховуються за формулами

$$K = \frac{V_{out} - V_{in}\eta}{V_{out}}; \quad L_1 = \frac{V_{in} * (V_{out} - V_{in})}{\Delta I * f * V_{out}}; \quad C_1 = \frac{I_{out} * K}{f * \Delta V_{out}},$$

де  $V_{out}$  – вихідна напруга boost перетворювача на конденсаторі  $C_1$ ;  $V_{in}$  – вхідна напруга boost перетворювача на дроселі  $L_1$ ;  $\eta$  – ККД перетворювача;  $\Delta I$  – зміна струму на  $L_1$ ;  $f$  – частота комутації IGBT;  $I_{out}$  – вихідний струм;  $\Delta V_{out}$  – коливання напруги на конденсаторі  $C_1$ ;  $K$  – допоміжний коефіцієнт.

У таблиці наведено розрахункові значення  $L_1$  та  $C_1$  для різної кількості фотоелектричних панелей за максимальної потужності генерації для кожної панелі ( $I=9A$ ;  $U=35V$ ),  $f=50$  кГц.

Кількість панелей	$L_1$ , мГн	$C_1$ , мкФ	$V_{in}$ , В	$f$ , кГц	$I_{out}$ , А	$V_{out}$ , В	$\eta$	$\Delta I$ , А	$\Delta V_{out}$ , В
2	1,5	10	70	25	1,6	360	0,9	1,5	5
3	1,9	14	105	25	2,4	360	0,9	1,5	5
4	2,2	16	140	25	3,2	360	0,9	1,5	5
5	2,4	18	175	25	4,0	360	0,9	1,5	5
6	2,3	18	210	25	4,8	360	0,9	1,5	5
7	2,0	17	245	25	5,6	360	0,9	1,5	5
8	1,6	15	280	25	6,4	360	0,9	1,5	5
9	1,0	12	315	25	7,2	360	0,9	1,5	5
10	0,3	8	350	25	8,0	360	0,9	1,5	5

З розрахункових значень вибираємо найбільші, тобто при  $L_1=2,4$  мГн та  $C_1=18$  мкФ boost перетворювач енергетичної комірки (рис. 4) буде забезпечувати максимальний відбір електричної енергії від фотоелектричних панелей при кількості від 2 до 10. Для керування

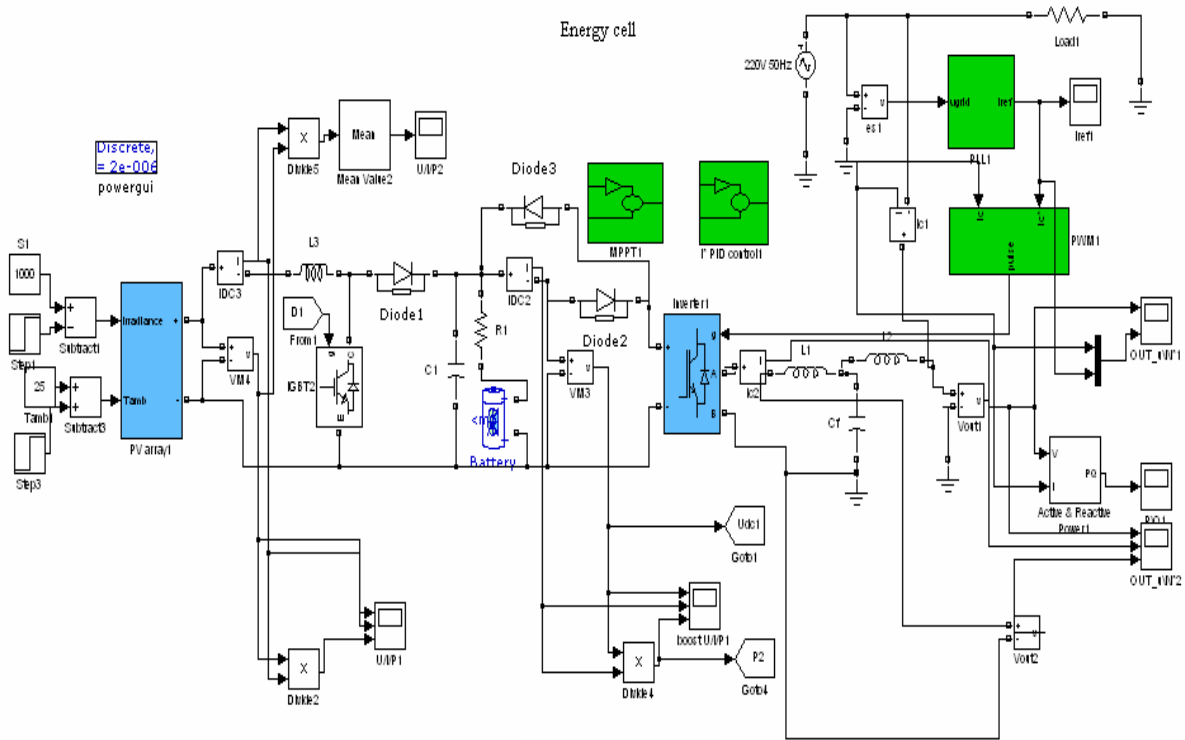
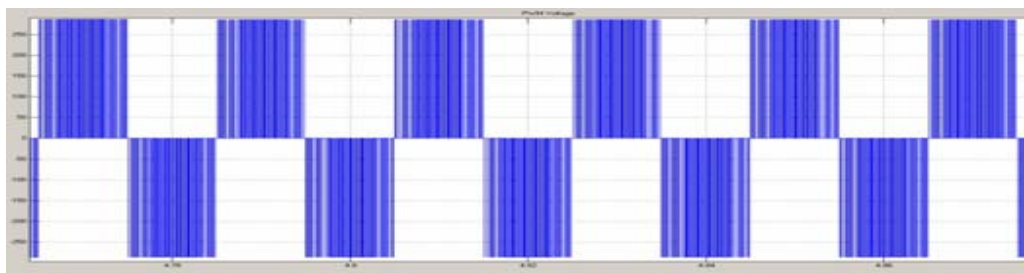


Рис. 4

коміркою було створено алгоритм, де поєднуються функції інверторів напруги, працюючих як на автономне навантаження, так і на загальну мережу, де необхідно синхронізувати вихідний струм комірки з напругою мережі. Це досягається фазовим автопідстроюванням частоти (ФАПЧ). Розрахункова частота, частота мережі  $\omega_e$  та фазовий кут  $\theta_e$  використовуються не тільки для контролю і генерації сигналів, а також для захисту в моменти переходу з мережевого на автономний режим роботи або навпаки. Для реалізації розробленого алгоритму необхідно використовувати спеціальні dsp мікроконтролери [1], які дають змогу в однопроцесорній системі керування виконувати всі наведені вище функції, включаючи зв'язок із зовнішнім комп'ютером через UART, Bluetooth або Wi-Fi.

Важливим елементом енергетичної комірки є вихідний мережевий синусоїдальний фільтр, який розраховується за формулою [3]



а



б

Рис. 5

$$F = \frac{1}{2} \pi \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f}},$$

де  $F$  – частота мережі,  $L_1, L_2$  – індуктивності, а  $C_f$  – ємність фільтра. На рис. 5 представлено розрахункові напруги на виході інвертора:  $a$  – без фільтра;  $b$  – з фільтром.

З викладеного можна зробити такі висновки:

1. Запропонована енергетична комірка ефективна при кількості фотоелектричних панелей від 2 до 10, тобто для потужності від 500 до 2,5 кВт.

2. Voost перетворювач працює у режимі керованого джерела струму з урахуванням вимог МРРТ. Розрахункові параметри  $L_1=2,4$  мГн та  $C_1=18$  мкФ при частоті комутації 25 кГц дають змогу виконати його при невеликих вартості та розмірі, що робить це технічне рішення конкурентоспроможним у порівнянні з використанням мережевого або імпульсного трансформатора.

3. Результати розрахунку показують можливість технічної реалізації наведеного алгоритму керування енергетичною коміркою при використанні сучасних dspic мікроконтролерів та IGBT.

1. *Войтех В.О.* Застосування мікроконтролерів компанії Microchip серії dspic33 MC для керування напівпровідниковими інверторами напруги // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2016. – Вип. 43. – С. 107–111.
2. *Freris L. and Infield D.* Renewable Energy in Power Systems // John Wiley & Sons Inc, Chichester, United Kingdom, 2008.
3. *Renzhong Xu, Lie Xia, Junjun Zhang and Jie Ding.* Design and Research on the LCL Filter in Three-Phase PV Grid-Connected Inverters // International Journal of Computer and Electrical Engineering. – June 2013. – Vol. 5, No. 3. – P. 322–325.
4. TESLA ENERGY <https://www.teslamotors.com/presskit/teslaenergy>

УДК 621.472

**В.А. Войтех**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Київ-57, 03680 Украина

#### **Энергетические ячейки для возобновляемых источников энергии**

*Приведены особенности построения автономных и сетевых фотоэлектрических систем, разделение их по мощностям и схемам подключения фотоэлектрических панелей, предложены структура и расчетная схема энергетической ячейки, что позволяет использовать количество панелей от 2 до 10 с обеспечением необходимого качества выходного напряжения. Разработан алгоритм управления ячейкой для однопроцессорной схемы, позволяющей обеспечить все режимы работы ячейки с необходимыми параметрами выходного напряжения и внешней связи с центральным компьютером. Библи. 4, рис. 5, таблица.*

**Ключевые слова:** энергетическая ячейка, фотоэлектрическая панель, инвертор, микроконтроллер, возобновляемые источники энергии, IGBT, алгоритм, математическая модель, программирование, аккумулятор.

#### **V.O. Voitek**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

#### **The energy cells for renewable energy**

*Stand-alone and network photovoltaic systems features for different power and schemes have showed, the structure and design scheme of hybrid energy cell for panels number from 2 to 10 with the provision of the required quality of the output voltage have proposed. The algorithm for one processor control system that allows for all modes of energy cell parameters required output voltage and external communications with the central computer have made. References 4, figures 5, table.*

**Key words:** energy cell, PV panel, inverter, microcontroller, renewable energy source, IGBT, algorithm, mathematical model, programming, accumulator.

Надійшла 20.04.2016

Received 20.04.2016