

## ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ КІНЕТИЧНИХ ЕНЕРГОНАКОПИЧУВАЧІВ ЯК АКУМУЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

Кравець В.А., Савченко Н.П., Трет'як А.В.

Донбаська національна академія будівництва і архітектури  
вул. Героїв Небесної Сотні, 14, 84333, м. Краматорськ, Донецька обл.  
natali\_a\_savchenko@ukr.net

Перспективи розвитку систем зберігання енергії надзвичайно важливі для усіх галузей енергетики як із технічного, так і з екологічного погляду. Останнім часом загострилося питання зберігання енергії в автономних системах електропостачання з альтернативними джерелами енергії. Можливість оперативного підключення споживачів до системи зберігання енергії у разі її нестачі від гібридної вітросонячної установки є одною з основних вимог у разі використання систем альтернативного електропостачання. Другою важливою вимогою є екологічність систем альтернативного електропостачання, яка потребує використання екологічно чистих елементів системи, що не забруднюють навколишнє середовище. У роботі виконано аналіз структури систем зберігання енергії у складі систем електропостачання з альтернативними джерелами енергії, як автономних, так і при підключенні до розподільчої електричної мережі, та виявлено основні елементи, що впливають на забруднення навколишнього середовища. Розглянуто і визначено переваги та недоліки акумулюючих пристроїв, які використовуються у системах зберігання енергії. Виявлено, що найбільш поширеними акумулюючими пристроями у складі систем зберігання енергії є хімічні акумулятори, у яких містяться важкі метали та кислоти, що завдають значної шкоди навколишньому середовищу у разі потрапляння у воду та ґрунт. Зроблені висновки стосовно екологічності хімічних накопичувачів енергії та їх утилізації вказують на необхідність їх заміни альтернативними накопичувачами, котрі є екологічними. З метою підвищення екологічності системи зберігання енергії запропоновано використання стаціонарних кінетичних накопичувачів енергії, в яких для зберігання електроенергії її перетворюють у механічну, а у разі підключення навантаження – навпаки, в електричну. Визначено, що використання кінетичних накопичувачів енергії повністю є екологічним і безпечним порівняно з іншими акумулюючими пристроями. *Ключові слова:* екологічність, система зберігання енергії, кінетичний енергонакопичувач (КЕН), акумулюючий пристрій, вітроенергетична установка (ВЕУ), фотоелектричні перетворювачі (ФЕП).

**Improving the environmental friendliness of energy storage systems when using kinetic energy storage devices as storage devices. Kravets V., Savchenko N., Tretyak A.** Prospects for the development of energy storage systems are extremely important for all energy sectors both from a technical and an environmental point of view. Recently, the issue of energy storage in the autonomous power supply systems with alternative energy sources has become very acute. The possibility of operative connection of consumers to the energy storage system in case of its lack of a hybrid windshield is one of the main requirements for the use of alternative power supply systems. The second important requirement is the environmental friendliness of alternative power supply systems, which requires the use of environmentally friendly elements of the system that do not pollute the environment. The paper analyzes the structure of energy storage systems as part of power supply systems with alternative energy sources, both autonomous and when connected to a distribution electrical grid, and identifies the main elements that affect the pollution of the environment. The advantages and disadvantages of storage devices used in energy storage systems are considered and identified. It was discovered that the most common accumulating devices in the storage of energy are chemical accumulators that contain heavy metals and acids, which cause significant damage to the environment when it enters the water and soil. Conclusions regarding the environmental friendliness of chemical storage and energy utilization indicate the need to replace them with alternative environmental drives. In order to increase the environmental friendliness of the energy storage system, it is proposed to use stationary kinetic energy storage devices, in which they are converted into mechanical energy for storage of energy, and when the load is connected to the electric one. It has been determined that the use of kinetic energy storage devices is completely environmentally friendly and safe compared to other accumulating devices. *Key words:* environmental friendliness, energy storage system, kinetic energy storage (KES), storage device, wind power installation (wind turbine), photoelectric converters (PEC).

**Постановка проблеми.** Автономні системи електропостачання з альтернативними джерелами енергії нині бурхливо розвиваються, що пов'язано з енергетичною ефективністю будівель та екологічними питаннями щодо виробництва електроенергії. Отримання електричної енергії від природних явищ, таких як вітер і сонце, дозволяє зробити її екологічно «чистою» – її виробництво не забруднює навколишнє середовище й обходиться дешевше,

ніж розробка та видобуток традиційних джерел. Однак у разі використання альтернативних джерел виникає проблема зберігання електричної енергії. Рішенням цього питання є монтування у складі таких систем електропостачання акумулюючих пристроїв, які є основним елементом систем зберігання енергії. Від типу акумулюючого пристрою залежить продуктивність та екологічність системи зберігання енергії.

**Актуальність дослідження.** Найбільш поширеними акумулюючими пристроями у складі систем зберігання енергії є хімічні акумулятори, у яких містяться важкі метали та кислоти, що завдають значної шкоди навколишньому середовищу у разі потрапляння у воду та ґрунт. Утилізація хімічних джерел струму є небезпечним і недешевим заходом, який можуть виконувати тільки спеціалізовані компанії. Тому з погляду екологічності особливий інтерес викликає дослідження електромеханічних накопичувачів для застосування у складі систем зберігання енергії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останнім часом спостерігається підвищений інтерес до систем накопичення електроенергії як для побутового, так і для промислового використання. За оцінками експертів, річне зростання світового ринку накопичувачів електроенергії становить 27%. Також маємо об'єктивні передумови для широкого впровадження систем накопичувачів в Україні. Це пов'язано, по-перше, з появою систем локальної електрогенерації, по-друге, з розвитком різновидів накопичувачів.

Загальний порівняльний аналіз типів накопичувачів, застосовуваних в енергетиці, наведено в наукових працях М.І. Смоленцева, Б.А. Алексєєва, А.Г. Сошинова, Г.Г. Угарова та ін. [1–4].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Вже зараз є чимало фірм і компаній, котрі виробляють системи накопичення електроенергії, серед яких Tesla, PeaconPower, ATZ та ін. Але незважаючи на бурхливий розвиток технологій, рішення питання оптимізації систем накопичення електроенергії, особливо їх роботи в умовах конкретних систем «альтернативне джерело енергії – накопичувач – споживач», а саме з використанням як накопичувача КЕН, достатньо не опрацьовані.

**Метою дослідження** є аналіз і деталізація складників системи зберігання енергії, які використовуються в автономних системах електропостачання, що забезпечить підвищення їх екологічності за рахунок застосування електромеханічних акумулюючих пристроїв.

**Виклад основного матеріалу.** Вибір системи накопичення енергії та її складників залежить від потреб електричної мережі. Основним елементом усього різноманіття систем зберігання енергії є накопичувальні пристрої, саме завдяки їм визначається економічність, ефективність та екологічність системи. З виконаного аналізу маємо, що як акумулюючі пристрої для автономних систем електропостачання можуть використовуватися конденсаторні батареї, акумулятори або кінетичні енергонакопичувачі (маховики).

У загальному вигляді накопичувачі енергії – це пристрої, які дозволяють накопичувати в них енергію будь-якого виду протягом періоду заряду  $t_z$ , а потім передавати значну частину цієї енергії наван-

таженню протягом періоду розряду  $t_p$ . Взаємозв'язок параметрів накопичувача при заряді та розряді визначається законом збереження енергії, що виражається очевидним співвідношенням [3]:

$$P_z t_z \eta = P_p t_p, \quad (1)$$

Внаслідок сильної нерівномірності графіка електричних навантажень в автономних системах електропостачання застосування батарей конденсаторів фіксованої ємності малоефективне [2].

Акумуляторні батареї мають суттєвий недолік – це обмежене число зарядно-розрядних циклів, наявність саморозряду і негативний екологічний вплив [4].

Особливий інтерес викликає застосування електромеханічних накопичувачів для систем автономного електропостачання, а саме кінетичних енергонакопичувачів. Важливою складовою частиною КЕН є механічний інерційний накопичувач – маховик. Від його конструкції залежить кількість накопиченої енергії.

Рівняння руху маховика, справедливе як у режимі заряду, так і розряду, має вигляд [5]:

$$M_{\text{зов}} = M_{\text{дин}} - M_{\text{т}} = J \frac{d\omega}{dt} - M_{\text{т}}, \quad (2)$$

де  $M_{\text{зов}}$  – зовнішній момент, який є активним (рушійним) моментом при заряді або реактивним (гальмівним) моментом при розряді маховика;

$M_{\text{дин}}$  – динамічний момент, знак якого визначається кутовим прискоренням  $\frac{d\omega}{dt}$ ;

$J$  – момент інерції маховика;

$M_{\text{т}}$  – момент тертя, що визначається за формулою [5]:

$$M_{\text{т}} = M_{\text{т,а}} + M_{\text{т,п}}, \quad (3)$$

де  $M_{\text{т,а}}$  – момент аеродинамічного тертя;

$M_{\text{т,п}}$  – момент тертя у підшипникових опорах.

Тоді рівняння балансу енергії виглядатиме [5]:

$$J \frac{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{2} - \int_{t_1}^{t_2} \omega M_{\text{т,а}} dt - \int_{t_1}^{t_2} \omega M_{\text{т,п}} dt = \int_{t_1}^{t_2} \omega M_{\text{зов}} dt, \quad (4)$$

де  $\omega_1, \omega_2$  – початкова та кінцева кутові швидкості маховика;

$t_1, t_2$  – відповідні значення часу.

У загальному вигляді рівняння (4) має вигляд:

$$W_{\text{к}} - W_{\text{т}} = W, \quad (5)$$

де  $W_{\text{к}}$  – кінетична енергія;

$W_{\text{т}}$  – енергія втрат на тертя;

$W$  – повна енергія, яка відводиться від маховика.

Згідно з виразом (5) маємо, що кінетична енергія маховика витрачається на енергію, яка відводиться від маховика, й енергію втрат на тертя, тому для підвищення ефективності маховика необхідно збільшити можливий рівень початкової кінетичної енергії та звести до мінімуму енергію втрат [5].

Сучасні електромеханічні накопичувачі енергії мають суттєву перевагу над іншими видами сис-

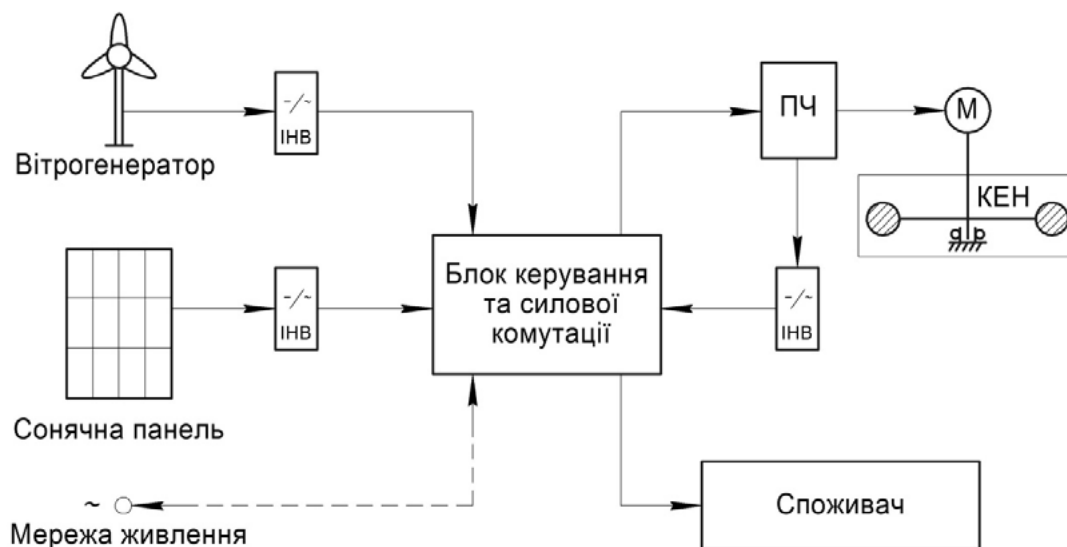


Рис. 1. Структурна схема оптимізованої системи накопичення з використанням КЕМ для автономної системи електропостачання

тем акумулювання в ефективності відновлення енергії (кВт · год на розряд по відношенню кВт·год на заряд). ККД в них перевищує 95%, що значно краще, ніж у будь-якої свинцево-кислотної батареї. Питома величина збереженої енергії може досягати 5–10 кВт, що в кілька десятків разів вище, ніж у електрохімічних батарей.

Розробка оптимізованої системи накопичення з використанням КЕМ може дати конкурентну перевагу тим чи іншим системам накопичувачів. Оптимізація системи накопичення може бути виконана за рахунок використання гібридних систем накопичувачів або масштабованих систем із КЕМ, налаштуванням параметрів контролера системи [6; 7].

Структурна схема оптимізованої системи накопичення з використанням КЕМ для автономної системи електропостачання наведена на рис. 1. Принцип дії схеми такий. Надлишкова електроенергія з джерел, яку не використав споживач, у певний час через перетворювач частоти (ПЧ) подається на електродвигун, котрий розкручує маховик для запасу кінетичної енергії. Після того, як споживач відновив здатність утилізувати одержувану електроенергію, генератор перетворює енергію обертання назад в електроенергію, яку з ланки постійного струму отримує інвертор (ІНВ) і через блок силової комутації передає споживачу. Якщо врахувати, що сучасні електродвигуни та генератори володіють високим ККД, а втрати з використанням сучасних технологій і матеріалів у конструкції накопичувача мінімальні, можна зробити висновок, що використання електродинамічного накопичувача у зв'язці «виробник – споживач» в автономних енергосистемах є перспективним рішенням.

Одним із основних завдань для запропонованої на рис. 1 схеми є задача розподілу навантажень між генеруючими потужностями. Якщо сумарна потужність ФЕМ і ВЕУ, яка надходить до споживача, не менша за навантаження споживача, то вся вона покривається за рахунок ВДЕ. Якщо спостерігається надлишок потужності, то він надходить на зарядку накопичувачів. У разі, коли накопичувачі вже заряджені повністю, на відповідну величину скорочується потужність ВЕУ. Причому спочатку регулюються ВЕУ (як найбільш зношується), а потім ФЕМ. Також можливе транспортування енергії у загальну мережу живлення. Якщо сумарна потужність ВДЕ менша за навантаження споживачів, то нестача потужності покривається за рахунок накопичувачів [8].

Перевагою системи накопичення з використанням КЕМ для автономної системи електропостачання є підвищення рівня екологічної безпеки й ефективності відновлення енергії.

**Головні висновки.** Аналіз проведених теоретичних досліджень у статті демонструє перспективи застосування кінетичних енергонакопичувачів в автономних системах електропостачання, що дозволить підвищити екологічність системи накопичення енергії та знизити експлуатаційні витрати за весь термін служби.

Таким чином, принциповою відмінністю запропонованої структурної схеми автономного електропостачання з кінетичними енергонакопичувачами є її високий рівень екологічності, адже всі складові частини системи є екологічно «чистими» та чинять мінімальний шкідливий вплив на навколишнє середовище.

## Література

1. Смоленцев Н.И. Накопители энергии в локальных электрических сетях. *Ползуновский вестник*. Барнаул, 2013. Вып. 4 (2). С. 176–181.
2. Алексеев Б.А. Применение накопителей энергии в электроэнергетике. *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. Москва, 2005. Вып. 1. С. 42–46.
3. Сошинов А.Г., Угаров Г.Г. Накопители энергии в электроэнергетических системах : учебное пособие. Волгоград : ВолгГТУ, 2007. 106 с.
4. Возмилов А.Г., Андреев А.А., Калмаков В.А. Особенности эксплуатации накопителей энергии на основе химических источников тока в составе автономных энергосистем. *Наука ЮУрГУ : материалы 67-й научной конференции. Секции технических наук*. Челябинск, 14–17 апреля 2015 г. С. 47–51.
5. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В. Накопители энергии / под ред. Д.А. Бута. Москва : Энергоатомиздат, 1991. 400 с.
6. Shevchenko S.Yu., Savchenko N.A., Tretjak A.V. Managing the load schedule of the administrative building taking into account emerging risks when connecting the kinetic energy storage to the power supply system. *Електротехніка і електромеханіка*. Харків, 2017. Вип. 6. С. 69–73. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.6.11.
7. Савченко Н.П., Шевченко С.Ю. Математична модель системи електропостачання адміністративної будівлі з кінетичним енергонакопичувачем. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук, 2018. Вип. 1 (41). С. 47–52. DOI: 10.30929/2072-2052.2018.1.41.
8. Карамов Д.Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии. *Вестник ИрГТУ*. Иркутск, 2015. Вып. 9 (104). С. 133–139.