УДК 621.31

DOI <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2020.37.10>**Савченко Н.П.**

к.т.н., доцент кафедри машинобудування,
Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
м. Краматорськ, Донецька область

Трет'як А.В.

к.т.н., доцент кафедри машинобудування,
Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
м. Краматорськ, Донецька область

АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЛІ З ГІБРИДНОЮ СИСТЕМОЮ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОМУ КЕРУВАННІ ГЕНЕРАЦІЄЮ ТА СПОЖИВАННЯМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Анотація. У сучасному світі гостро стоїть питання розвитку енергозберігаючих технологій як загалом, так і у сфері будівництва. Тому досить обґрунтованим є використання нетрадиційних джерел енергії в системах електропостачання будівель. Але такі системи не завжди стабільні та залежать від погодних умов та місця розташування. У зв'язку з цим найкращим рішенням є застосування гібридних систем електропостачання з метою підвищення енергоефективності будівель, як новобудов, так і реконструйованих, за умови незмінного зростання рівня комфортності і, як наслідок, рівня енергоспоживання. Також важливим питанням для забезпечення енергоефективності є організація гібридних систем електропостачання будівель, а саме: по-перше, доцільність та енергоефективність складників такої системи, по-друге, забезпечення ефективного алгоритму керування за допомогою інтелектуальних систем. Рішенням оптимального складу гібридних систем електропостачання будівель є наявність таких складників, як традиційне джерело енергії, а саме: міська електрична мережа, нетрадиційне джерело енергії, система накопичення та зберігання електричної енергії і система керування генерацією та споживанням електроенергії. Для підвищення енергоефективності гібридної системи електропостачання більша частина споживаної енергії має використовуватися від встановленого альтернативного джерела енергії. Надлишки енергії, отриманої від альтернативного джерела енергії, мають накопичуватися в екологічно чистих системах зберігання енергії, побудованих на механічних накопичувачах. Ефективне керування гібридною системою електропостачання будівлі може бути досягнене методом зонування будівлі, управління опаленням, кондиціонуванням та освітленням залежно від присутності людей у приміщеннях. Широке впровадження гібридних систем електропостачання будівель має ґрунтуватися, насамперед, на привабливості для споживачів, яка полягає у підвищенні енергоефективності будівлі, збільшенні незалежності від режимів роботи розподільчих електричних мереж, підвищенні якості та надійності електропостачання, зменшенні витрат на закупівлю електроенергії та теплоносіїв. Також розвиток та оптимізація гібридних систем електропостачання будівель з інтелектуальним керуванням призведе до зниження навантаження на міські електричні мережі низької напруги 0,4 кВ та підвищення надійності їх роботи за рахунок зменшення аварійних ситуацій.

Ключові слова: електрична мережа, гібридна система електропостачання, система накопичення електроенергії, відновлювальне джерело енергії (ВДЕ), фотоелектрична система (ФЕС), система керування.

Постановка проблеми. Постійне збільшення кількості нових об'єктів будівництва та реконструкції вже збудованих призводить до виникнення проблеми забезпечення

їх електричною енергією необхідної потужності та тепловою енергією. Електричні мережі міст здебільшого є зношеними, такими, що не завжди витримують навантаження,

а підключення нових потужностей новобудов є або технічно неможливим, або потребує досить великих інвестиційних вкладень. Також згідно із Законом України «Про енергетичну ефективність будівель» у процесі нового будівництва, реконструкції, капітального ремонту необхідно дотримуватись зменшення споживання енергії в будівлях [1]. Тому логічним рішенням цієї проблеми є збільшення частки автономних систем, де це можливо, але здебільшого запровадження гібридних систем електропостачання з джерелами відновлювальної енергії та технологією інтелектуального керування генерацією та споживанням. При цьому велику вагу має рішення питання оптимального складу гібридної системи електропостачання та екологічності компонентів виробництва та зберігання електроенергії.

Таким чином, підвищення енергоефективності будівель є необхідністю, яка диктується часом та законодавчою базою України.

Аналіз останніх досліджень. Проблема підвищення енергоефективності будівель із гібридними системами електропостачання є досить актуальною та досліджується в багатьох наукових працях [2–6]. Але питання оптимальності складників гібридних систем електропостачання потребують подальших

досліджень з аналізом їх ефективності та екологічності.

Мета роботи. Метою статті є аналіз енергоефективності та економічної ефективності запропонованої гібридної системи електропостачання будівлі та розробка алгоритму керування системою.

Результати досліджень. Створення гібридних систем електропостачання будівель як єдиного механізму підвищення енергоефективності є однією з основних задач сучасного будівництва.

Підвищення енергоефективності гібридних систем електропостачання залежить від оптимізації режимів роботи усіх складників. Проведення порівняльного аналізу гібридних систем електропостачання будівель дало змогу зробити висновок, що схема з фотоелектричними перетворювачами енергії є найбільш оптимальною та енергоефективною. З урахуванням питань екологічності була розроблена блок-схема гібридної системи електропостачання будівлі з інтелектуальним керуванням, яка наведена на рис. 1. Основними компонентами розробленої схеми є:

- 1) фотоелектрична станція (ФЕС), яка складається з фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) та гібридного інвертора;
- 2) кінетичний енергонакопичувач (КЕН);

Рис. 1. Блок-схема гібридної системи електропостачання будівлі з інтелектуальним керуванням

3) система контролю, яка складається з датчиків струму, температури та присутності;

4) система керування, яка має у своєму складі інтелектуальний контролер задля керування енергопотоками.

Розробка алгоритму ефективного управління робочими режимами гібридної системи електропостачання будівлі базується на виборі схемної конфігурації системи. Маємо три такі конфігурації [6]:

1) роздільна робота електромережі і ФЕС із накопичувачем електроенергії (рис. 2, а);

2) робота ФЕС паралельно з електромережою (рис. 2, б);

3) гібридний варіант, що передбачає можливість реалізації роздільної та спільної роботи ФЕС і електромережі (рис. 2, в).

Проведений аналіз схемної конфігурації вказує, що схема, наведена на рис. 2, в, є привабливішою у плані енергоефективності, тому що практично повністю забезпечує споживача електроенергією з ВДЕ.

Таким чином, згідно з вибраною схемною конфігурацією, робота гібридної системи електропостачання, наведеної на рис. 1, полягає в такому: користувач задає необхідні налаштування в системі керування, яка представляє собою програмований логічний контролер із набором необхідних у кожному окремому випадку інтерфейсів. До параметрів налаштувань входить необхідна тем-

пература у будівлі, її окремих приміщеннях, можливо окремих ділянках досить великих кімнат. Також можливе керування освітленням, якщо потужність освітлення суттєво впливає на енергоспоживання будівлі (для великих будівель).

Під час роботи система опитує наявні датчики та за заданим алгоритмом вмикає/вимикає або регулює радіатори опалення, систему кондиціонування, вентиляції. Наприклад, задана температура у приміщенні $+18^{\circ}\text{C}$, без присутності людей і $+22^{\circ}\text{C}$ за наявності, система відповідним чином відрегулює опалення чи кондиціонування. У разі необхідності підігріву/охолодження частини великої кімнати система, отримавши з датчиків присутності розташування людей у кімнаті, підігріє ті радіатори, які розташовані ближче до людей.

У разі обмеження на навантаження міської електромережі система, отримавши дані з датчику струму, встановленого на введенні напруги в будівлю, скорегує системи будівлі належним чином (зменшивши потужність відключенням, регулюванням або переключенням на накопичувач).

У теплу пору року можливе керування кондиціонуванням та вентиляцією.

Енергію для опалення/кондиціонування система використовує переважно від встановленого на будівлі ВДЕ, коли її не вистачає, то додає з міської електромережі. У разі

Рис. 2. Схемна конфігурація гібридної системи електропостачання:

ФП – фотоелектричні панелі, ЕМ – електромережа, КЕН – кінетичний енергонакопичувач, Н – навантаження, U – шина змінного струму, І – інвертор

надлишку запасає її в кінетичному накопичувачі.

Для опалення за такої системи економічно доцільно використовувати керамічні нагрівальні панелі або теплові насоси. Адже ці системи добре піддаються керуванню, досить швидко змінюють температуру в заданій секції будівлі та енергоефективні.

Алгоритм функціонування гібридної системи електропостачання з гібридним інвертором може бути описаний за допомогою функцій алгебри логіки. При цьому необхідно розділяти системи генерації та споживання.

Для системи генерації як незалежні змінні можна вибрати такі величини [6]:

1) потужність генерації фотоелектростанції. Дискретне значення $X1 = 1$ відповідає перевищенню потужності ФЕС над поточним електроспоживанням навантаження. $X1 = 0$ відповідає нестачі фотоелектричної генерації;

2) стан кінетичного енергонакопичувача: $X2 = 1$, якщо він заряджений, $X2 = 0$, якщо розряджений нижче встановленого рівня.

Керуючі впливи здійснюються за допомогою логічних функцій [6]:

$U1 = 1$, $U1 = 0$ включає або відключає батарейний режим роботи гібридного інвертора;

$U2 = 1$, $U2 = 0$ включає або відключає мережевий режим роботи інвертора ФЕС;

$U3 = 1$, $U3 = 0$ включає або відключає електромережу;

$U4 = 1$, $U4 = 0$ включає КЕН на заряд або розряд.

Логіка функціонування гібридної системи електропостачання в залежності від зміни незалежних змінних наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

X1	X2	Y1	Y2	Y3	Y4
0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	0	0
1	0	1	0	0	1
1	1	1	0	0	1

Сформований алгоритм у вигляді функцій алгебри логіки [6]:

$$U1 = X1 \& \bar{X}2 \vee X1 \& X2 = X1, \quad (1)$$

$$U2 = \bar{X}1 \& \bar{X}2 \vee \bar{X}1 \& X2 = \bar{X}1, \quad (2)$$

$$U3 = \bar{X}1 \& \bar{X}2, \quad (3)$$

$$U4 = \bar{X}1 \& \bar{X}2 \vee X1 \& \bar{X}2 \vee X1 \& X2 = X1 \vee \bar{X}2, \quad (4)$$

Для системи споживання як незалежні змінні можна вибрати такі величини:

1) вимірювання датчиком температури – $X3$. Дискретне значення $X3 = 1$ відповідає температурі в межах норми, $X3 = 0$ температура нижче норми;

2) вимірювання датчиком присутності: $X4 = 1$, якщо у приміщенні присутні люди, $X4 = 0$ за відсутності людей.

Керуючі впливи здійснюються за допомогою логічних функцій:

$U5 = 1$, $U5 = 0$ включає або відключає роботу радіаторів опалення;

$U6 = 1$, $U6 = 0$ включає або відключає роботу системи освітлення;

$U7 = 1$, $U7 = 0$ включає або відключає систему вентиляції.

Логіка функціонування гібридної системи електропостачання в залежності від зміни незалежних змінних наведена в таблиці 2.

Таблиця 2

X3	X4	Y5	Y6	Y7
0	0	0	0	0
0	1	1	1	0
1	0	0	0	0
1	1	0	1	1

Сформований алгоритм у вигляді функцій алгебри логіки:

$$U5 = \bar{X}3 \& X4, \quad (5)$$

$$U6 = \bar{X}3 \& X4 \vee X3 \& X4 = X4, \quad (6)$$

$$U7 = X3 \& X4. \quad (7)$$

Економічна ефективність гібридних систем електропостачання будівель може бути визначена за такими критеріями:

1) наведені річні витрати на 1 кВт встановленої потужності ФЕС і вартість 1кВт год електроенергії визначаються за таким виразом [6]:

$$B = (P_n K + C) / P, \quad (8)$$

де P – встановлена потужність об'єкта електропостачання (кВт);

K – загальні капіталовкладення (грн.);

P_n – нормативний коефіцієнт рентабельності,

C – загальнорічні експлуатаційні витрати;

2) показник ефективності створення інтелектуальної гібридної енергосистеми визначається за формулою [3]:

$$E = \frac{C - C_{\text{гіб}}}{C_{\text{обл}}}, \quad (9)$$

де C – витрати на електроенергію без застосування інтелектуальної гібридної енергетичної системи;

$C_{\text{гіб}}$ – витрати на електроенергію із застосуванням інтелектуальної гібридної енергетичної системи;

$C_{\text{обл}}$ – витрати на придбання обладнання системи.

Аналіз запропонованої гібридної системи електропостачання з інтелектуальною системою керування вказує на її енергоефективність з огляду на поліпшені технічні характеристики вибраного обладнання, яке до того ж відрізняється екологічністю, надійністю та довговічністю.

Висновки. У статті виконаний аналіз енергоефективності запропонованої гібридної енергосистеми будівлі з джерелами відновлюваної енергії та системою керування генерацією та споживанням. В результаті аналізу гібридної енергосистеми виявлена її оптимальна конфігурація і розроблений ефективний алгоритм керування, що призведе до підвищення енергоефективності будівель та вирішить питання організації інженерних мереж. Також у результаті практичного застосування запропонованої гібридної системи електропостачання можуть бути скорочені витрати на електроенергію та зменшено навантаження на електричні мережі низької напруги.

Література

1. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19>.
2. Щербakov М.В., Набиуллин А.С., Камаев В.А. Мультиагентная система моделирования производства и потребления электроэнергии в гибридных энергетических системах. *Инженерный вестник Дона*. 2012. Вып. 2(20). С. 217–221.
3. Май Н.Т., Ха В.М., Камаев В.А., Щербakov М.В. Моделирование и оптимизация управления интеллектуальной гибридной энергосистемой с источниками возобновляемой энергии. *Управление большими системами*. 2013. Вып. 46. С. 293–309.
4. Бубенчиков А.А., Бубенчикова Т.В., Погорелов А.А., Гаилов И.А., Манакowa Е.А., Захаров А.А. «УМНЫЕ» системы энергообеспечения. Научно-технические основы развития промышленности, энергетики, сельского хозяйства и повышение конкурентоспособности отраслей. *Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции*. Москва. 2018. С. 94–100.
5. Тюхов И.И., Беренгартен М.Г., Вариводов В.Н., Симакин В.В. Особенности формирования интеллектуальных сетей гибридных комплексов энергоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии. *Возобновляемая энергетика: Проблемы и перспективы* : II Международная конференция. Махачкала, 2010. С. 238–245.
6. Лукутин Б.В. Интеллектуальные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями : учебное пособие. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2019. 115 с.

References

1. Zakon Ukraini «Pro yenergetichnu yefektivnist budnvel». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19>.
2. Shcherbakov M.V., Nabiullin A.S., Kamayev V.A. Multiagentnaya sistema modelirovaniya proizvodstva i potrebleniya elektroenergii v gibridnykh energeticheskikh sistemakh. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2012. Vyp. 2(20). Pp. 217–221.
3. May N.T., Kha V.M., Kamayev V.A., Shcherbakov M.V. Modelirovaniye i optimizatsiya upravleniya intellektualnoy gibridnoy energosistemoy s istochnikami vozobnovlyayemoy energii. *Upravleniye bolshimi sistemami*. 2013. Vyp. 46. Pp. 293–309.
4. Bubenchikov A.A., Bubenchikova T.V., Pogorelov A.A., Gaibov I.A., Manakova Ye.A., Zakharov A.A. «UMNYE» sistemy energoobespecheniya. Nauchno-tekhnicheskiye osnovy razvitiya promyshlennosti, energetiki, selskogo khozyaystva i povysheniye konkurentosposobnosti otrasley. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Moskva, 2018. Pp. 94–100.
5. Tyukhov I.I., Berengarten M.G., Varivodov V.N., Simakin V.V. Osobennosti formirovaniya intellektualnykh setey gibridnykh kompleksov energosnabzheniya s ispolzovaniyem vozobnovlyayemykh istochnikov energii. *Vozobnovlyayemaya energetika: Problemy i perspektivy* : II Mezhdunarodnaya konferentsiya. Makhachkala. 2010. Pp. 238–245.
6. Lukutin B.V. Intellektualnyye sistemy elektrosnabzheniya s vetrovymi i solnechnymi elektrostantsiyami : uchebnoye posobiye. Tomsk : Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2019. 115 p.

ANALYSIS OF THE ENERGY EFFICIENCY OF A BUILDING WITH A HYBRID ELECTRICAL SYSTEM IN INTELLECTUAL CONTROL OF GENERATION AND CONSUMPTION OF ELECTRICITY

Abstract. *In today's world, the question of the development of energy-saving technologies, both in general and in the field of construction, is urgent. Therefore, it is quite reasonable to use non-traditional energy sources in the power supply systems of buildings. But such systems are not always stable and depend on weather conditions and location. In this regard, the best solution is to use hybrid power systems to improve the energy efficiency of buildings, both new and refurbished, provided that the level of comfort and, consequently, the level of energy consumption remains constant. Also important for ensuring energy efficiency is the organization of hybrid power systems for buildings, namely, first, the feasibility and energy efficiency of components of such a system, and second, the provision of an efficient control algorithm using intelligent systems. The solution to the optimal composition of hybrid power supply systems for buildings is to have such components as a traditional energy source, namely urban electricity grid, non-traditional energy source, electricity storage and storage system, and power generation and consumption management system. To increase the energy efficiency of a hybrid power system, most of the energy consumed must be used from an installed alternative energy source. Excess energy from alternative energy sources should be stored in environmentally friendly energy storage systems built on mechanical storage. Effective management of a hybrid building supply system can be achieved by building zoning, heating, air conditioning and lighting, depending on the presence of people on the premises. The widespread adoption of hybrid building supply systems should be based primarily on consumer attractiveness, which is to improve the energy efficiency of the building, to increase its independence from the modes of distribution grids, to improve the quality and reliability of electricity, and to reduce the cost of energy. Also, the development and optimization of hybrid power supply systems for buildings with intelligent control will reduce the load on urban low-voltage electricity grids of 0.4kV and increase their reliability by reducing emergencies.*

Key words: *electric grid, hybrid power supply system, electricity storage system, renewable energy source (RES), photoelectric system (FES), control system.*

Savchenko N.P.

Ph.D. (Tech.), Associate Professor at the Mechanical Engineering Department,
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Kramatorsk, Donetsk region

Tretiak A.V.

Ph.D. (Tech.), Associate Professor at the Mechanical Engineering Department,
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Kramatorsk, Donetsk region