

І.В. Пекур, В.М. Сорокін, Д.В. Пекур

СОНЯЧНІ БАТАРЕЇ ЯК ЕЛЕМЕНТ ДИЗАЙНУ СУЧАСНИХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ БУДІВЕЛЬ

Розглянуто концепцію підвищення енергоефективності будівель шляхом розміщення на їхніх фасадах сонячних батарей. Проведено оцінку такого рішення з точки зору сучасного урбаністичного дизайну, а також визначено можливості підвищення енергоефективності освітлювальних систем сучасних будівель з використанням для їх живлення сонячних батарей. Реалізація комбінації живлення від відновлюваних джерел енергії та від стаціонарної електромережі без використання систем тривалого зберігання енергії (акумуляторів) дозволяє створювати системи, здатні повністю використати практично всю електроенергію, генеровану альтернативним джерелом енергії. При цьому енергетичні втрати при транспортуванні енергії будуть мінімальними. Відсутність в конструкціях таких систем акумуляторів дозволяє встановити лише проектно розраховану кількість сонячних батарей без необхідності робити значне резервування генеруючих потужностей для її накопичення чи роботи за несприятливих погодних умов. Додатковою перевагою відмови від накопичувачів енергії – акумуляторів є суттєве зниження використання екологічно небезпечних речовин, таких як свинець, літій та кислотні або лужні електроліти, виробництво яких негативно впливає на навколишнє середовище, а їхня утилізація вимагає витрат додаткових коштів. В роботі запропоновано використовувати касетні фасадні системи з вбудованими сонячними панелями, які дають змогу архітекторам створювати сучасний зовнішній вигляд будівель та споруд. Показано, що за відсутності систем слідкування за Сонцем, зменшення генерації складає 23% для випадку горизонтального розташування сонячних батарей у порівнянні з випадком оптимального кута (для м. Києва 40°) та 40 % для випадку вертикального встановлення сонячних батарей. Проведений аналіз вказує на можливість створення сучасного енергоефективного дизайну фасадів будівель як при проектуванні сучасних будівель, так і при реставраційних роботах фасадів існуючих споруд.

Ключові слова: освітлювальні системи, фасад, сонячні батареї, енергозбереження, енергоефективність, дизайн, будівля, світлодіод.

1. ВСТУП

В проектах будівель міст майбутнього, які створюють сучасні архітектори, енергоефективності приділяється особлива увага. Так, в роботі [1] розглянуто можливості використання для підвищення енергоефективності теплоізоляційних матеріалів, що зменшують потребу у обігріванні та охолодженні приміщень, відомі технології будівництва будівель з наднизьким [2] або «нульовим» [3] енергоспоживанням. Особливе місце для забезпечення енергоефективності будівель займають роботи, пов'язані з енергоефективністю освітлення [4], реалізація якого передбачена в будь-яких типах сучасних будівель та споруд.

Різноманіття технологій, що можуть бути застосовані в таких «будівлях майбутнього», змушує архітекторів вибирати найбільш перспективні технології енергоощадності, які мають економічно обґрунтоване використання.

Одним з викликів сучасного урбаністичного будівництва є розроблення нових конструктивних рішень, здатних не тільки підвищити енергоефективність, а й частково компенсувати енерговитрати окремих будівель.

Одним зі шляхів підвищення енергоефективності будівель може бути реалізація живлення їхніх систем освітлення з використанням відновлювальних джерел енергії, наприклад, сонячних батарей [5], що дозволяє досягти додаткового суттєвого заощадження споживаної електричної енергії від централізованої електромережі.

Сонячні фотоелектричні системи, що використовують безпосереднє перетворення світлової енергії у електричну, мають ряд переваг над іншими розповсюдженими системами отримання екологічно чистої електричної енергії, які використовують енергію

вітру (вітроелектростанції) та води (гідроелектростанції). До переваг сонячних батарей слід віднести: компактність та малогабаритність, порівняно невелику вартість, тривалий термін експлуатації, простоту конструкції, сучасний зовнішній вигляд. До їхніх недоліків належать: непостійна вихідна потужність вдень та вночі, пряма залежність вихідної потужності від кута падіння світлового потоку на їхню поверхню, деградація фотоелементів в умовах підвищених температур.

Сонячні батареї широко використовуються в країнах з високим рівнем інсоляції. В багатьох країнах використання сонячної екологічно чистої енергії стимулюється державою. Зокрема, в Німеччині держава компенсує 70% витрат на оснащення будинків сонячними батареями [6]. Загальна потужність встановлених у світі фотоенергетичних електростанцій на кінець 2019 року складала 635 ГВт, з них 132 ГВт – у Європі [7]. В середньому частка фотоелектричної генерації у світі складає 2,2% від споживаної електроенергії, в Європі – 3,9%, в Німеччині – 8,7%, а в Італії та Греції перевищує 7%.

В Україні сонячні фотоелектростанції також широко використовуються для отримання електричної енергії в промислових цілях, оскільки фотоенергетичний потенціал України достатній і перевищує потенціал європейського лідера в галузі фотоенергетики – Німеччину. Поштовхом для активізації будівництва промислових та приватних сонячних електростанцій в Україні стало прийняття закону про «Зелений тариф» у 2015 році. В Україні станом на початок 2021 року майже 30 тис. сімей встановили приватні СЕС [8]. Проте слід зазначити, що таке використання сонячних батарей не завжди є вигідним для держави з економічної точки зору, а «Зелений тариф», на відміну від Європи (де він відсутній або малий), є надмірно великим і лягає важким тягарем на споживачів і часто викликає негативну реакцію у суспільстві.

В той же час використання сонячних батарей є особливо актуальним для світлодіодних освітлювальних систем, які передбачають освітлення в денний час включно, наприклад, торговельні зали магазинів, складські та виробничі приміщення великої площі, підземні приміщення та автопаркові комплекси, тунелі та станції метрополітену, а також кімнати та простори будівель, що не передбачають природну інсоляцію. Останнє особливо важливе, враховуючи, що одним з основних завдань урбаністики в найближчі роки буде реконструкція існуючих будівель, їхня переорієнтація під нові завдання. Виробничі потужності в містах скорочуються, звільняючи тисячі квадратних метрів, які не передбачали природного освітлення. За деякими оцінками – це до третини площі сучасних агломерацій. Вивільнені приміщення перетворюються як в офіси і коворкінги, торговельні і культурні центри, так і в житлову нерухомість в стилі лофт.

Робота сонячних батарей базується на прямому перетворенні енергії Сонця в електричну енергію за допомогою напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів енергії – сонячних елементів, що значно спрощує їхнє використання для отримання екологічно чистої електроенергії. Сонячні батареї можуть розміщуватися на будь-яких поверхнях сучасних будівель, що мають високі рівні інсоляції. Окрім традиційного розміщення на дахах будівель, це можуть бути також їхні фасади.

Відома конструкція сонячної панелі Liberta Solar, яка інтегрована в касетну фасадну систему. Фасад з використанням панелей Liberta Solar надає архітектурі будівлі сучасний зовнішній вигляд [9]. В сучасних містах України такі системи поки що не набули широкого впровадження, проте загальний тренд на використання «зеленої енергії» дозволяє припустити можливість широкого впровадження таких систем у найближчому майбутньому.

Саме тому метою роботи було розроблення варіантів дизайну фасадів будівель з вбудованими сонячними батареями для створення сучасних енергоефективних будівель, зокрема, на прикладі освітлення будівлі центру художньо-естетичного виховання – художньої школи.

2. ЕФЕКТИВНІСТЬ ФАСАДНИХ СИСТЕМ З ВБУДОВАНИМИ СОНЯЧНИМИ БАТАРЕЯМИ

Максимальна можливість генерування електроенергії з використанням сучасних сонячних батарей для міста Києва становить близько 1400 кВт·год/м² на рік [10]. Проте слід зазначити, що такі значення можуть бути досягнуті лише при встановленні сонячних батарей з використанням систем слідкування за положенням Сонця.

При використанні сонячних батарей у реальних умовах для випадку їхнього стаціонарного встановлення кількість сонячної енергії зменшується та може бути визначена інтегруванням сонячної активності протягом дня з урахуванням розташування Сонця по відношенню до екватора, яке однозначно визначається схиленням (δ) та азимутом (α).

Схилення Сонця може бути розраховано для будь-якого дня року за формулою Купера [11]:

$$\delta = 23,45 \cdot \frac{\sin(360 \cdot [n - 80])}{365}, \quad (1)$$

де n – номер дня року, починаючи з 1 січня, для якого дорівнює $n = 1$.

Для визначення видимого положення Сонця над горизонтом на певній широті (L) можна скористатися залежністю:

$$\alpha = 90^\circ - |L - \delta|, \quad (2)$$

де α – висота Сонця над горизонтом.

Для врахування зміни інтенсивності сонячного випромінювання в результаті впливу атмосфери використовують методики, що підвищують точність визначення роботи такої системи. Зниження інтенсивності випромінювання за рахунок поглинання світла атмосферою може бути враховано на основі використання поняття атмосферної маси – відношення довжини шляху, яку проходить світло через атмосферу до найкоротшого можливого шляху (коли Сонце знаходиться в зеніті). Атмосферна маса дає можливість визначити зменшення інтенсивності випромінювання після проходження через атмосферу і може бути розрахована за залежністю:

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)}, \quad (3)$$

де θ – кут від вертикалі (зенітний кут):

$$\theta = 90 - \alpha. \quad (4)$$

Якщо розглянути випадок, в якому Сонце знаходиться прямо над головою, і $\theta = 0^\circ$, то атмосферна маса дорівнює одиниці.

Щоденну інтенсивність прямої складової сонячного світла можна визначити як функцію атмосферної маси. Експериментально отримане рівняння має вигляд [12]:

$$I_D = 1,353 \times 0,7 \left(AM^{0,678} \right), \quad (5)$$

де I_D – інтенсивність на площині, перпендикулярній до сонячних променів в кВт/м², AM – атмосферна маса. 1,353 кВт/м² – сонячна постійна, а коефіцієнт 0,7 враховує той факт, що лише близько 70% сонячного випромінювання, яке потрапляє на межу атмосфери, досягає

Землі. Коефіцієнт 0,678 – емпіричний коефіцієнт, що враховує неоднорідність атмосферних шарів.

Важливим є також врахування дифузного випромінювання, яке навіть при ясному небі становить близько 10% від прямого. Тому в ясний день загальна інтенсивність випромінювання I_G , що падає на модуль, орієнтований перпендикулярно до сонячних променів, може бути розрахована за залежністю:

$$I_G = 1,1 \times I_D \quad (6)$$

Наведені залежності дозволяють розрахувати мінімальне значення сонячної маси для будь-якого дня року та часу доби. Значення сонячної маси буде найменшим, коли Сонце перебуває в зеніті, тобто в момент полудня, а найбільшим в моменти сходу та заходу Сонця. Крім того, в залежності від дня року змінюється кут, на який піднімається Сонце в зеніті. Тому мінімальне значення атмосферної маси також змінюється. На рис. 1 наведено розрахунок зміни атмосферної маси та енергетичної інтенсивності освітлення, орієнтованої перпендикулярно до сонячних променів площини протягом року для міста Києва. Як видно з представленої залежності, мінімальне значення атмосферної маси змінюється протягом року від 1,1 до 3,5, тобто у 3,2 рази.

Додатково слід враховувати інші атмосферні явища, такі як стан неба, температура повітря, опади. Наявність та швидкість вітру також суттєво впливають на можливість генерування сонячної енергії фотоелектричними перетворювачами. Саме тому більш точним є визначення енергетичного потенціалу встановлених сонячних батарей на основі даних багаторічних спостережень. Так, на рис. 2 показана оцінка енергетичного потенціалу сонячних батарей для міста Києва, на основі даних спостереження за 2010-2020 роки, для випадку встановлення сонячних батарей під різними кутами до горизонту.

Як видно з рис. 2, при відсутності систем слідкування за Сонцем, зменшення генерації складає 23% для випадку горизонтального встановлення сонячних батарей у порівнянні з випадком оптимального кута (для м. Києва 40°) та 40 % для випадку вертикального встановлення сонячних батарей. В той же час вертикальне встановлення дозволяє уникнути необхідності проводити очищення батарей у зимовий час, знижує їхню забрудненість пилом та покращує їхнє охолодження в літній період, а також зменшує вірогідність їхнього пошкодження твердими опадами.

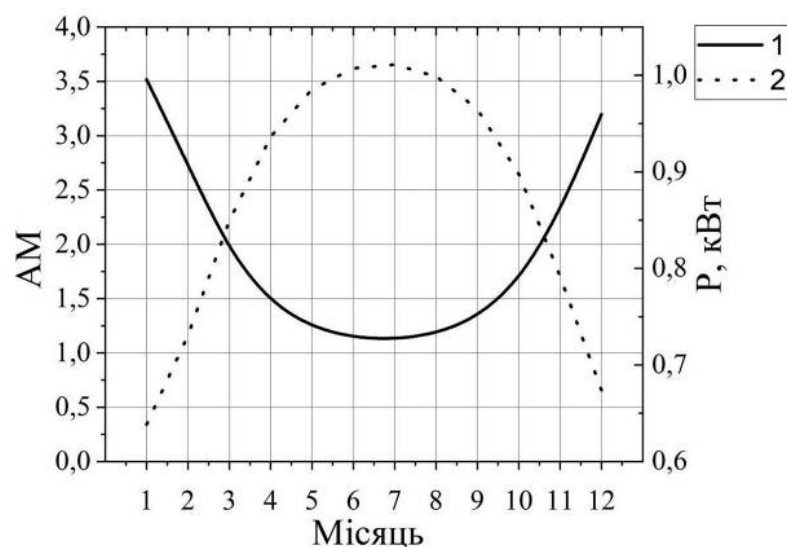


Рис. 1. Розрахункова річна залежність атмосферної маси для м. Києва (1) та розрахункова енергетична інтенсивність освітлення орієнтованої перпендикулярно до сонячних променів сонячної батареї (2).

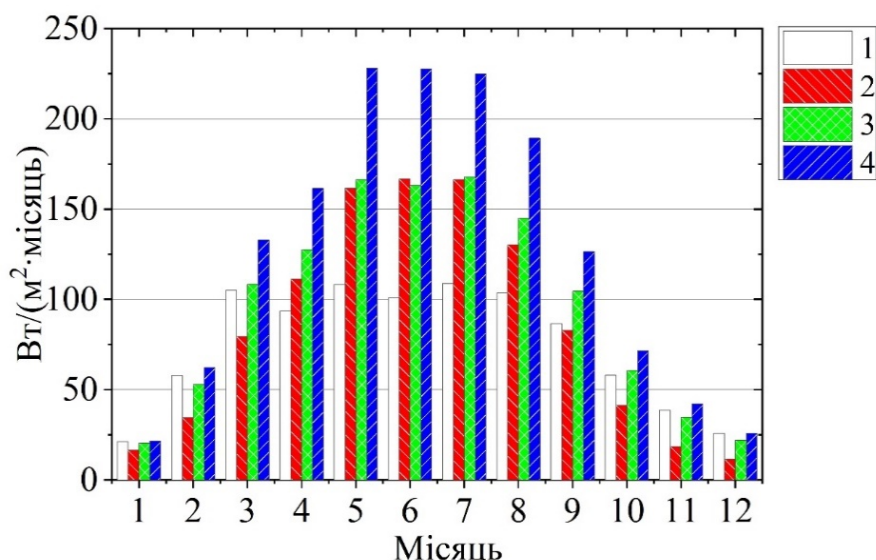


Рис. 2. Річна залежність інсоляції по місяцях для м.Києва, спостереження за 2010-2020 роки [13], 1 – горизонтальне встановлення; 2 – вертикальне встановлення; 3 – оптимальний кут встановлення; 4 – система слідкування за Сонцем.

Для вертикального встановлення сонячних батарей можна використовувати касетні фасадні системи [9], що можуть бути функціонально та візуально повністю інтегровані у дизайн фасаду та утворюють цілісну поверхню зі швами між панелями товщиною 8 мм. Такі конструкції можуть ефективно використовуватися для будівель, що потребують високої інтенсивності штучного освітлення приміщень в денний час, включно як елементи систем освітлення з комбінованим електроживленням.

Фасадні сонячні панелі [14] можуть мати текстури довільних будівельних матеріалів (дерево, мармур, цегла тощо), що дозволяє створювати унікальний дизайн енергоефективних фасадів та забезпечувати відповідність будівельним нормам та вимогам огорожувальних конструкцій.

Зазвичай фасадна сонячна панель (рис. 3) складається з таких шарів, починаючи з шару, що розміщується зовні: захисне скло, інкапсулянт, фотоелектричний перетворювач, термічний ущільнювач та електронні компоненти. Захисне скло з керамічним покриттям набуло широкого поширення для оздоблення внутрішніх та зовнішніх фасадів будівель. Керамічний друк на склі виконується спеціальними емалями, які наносять на скло до його термічного оброблення. До основних переваг використання керамічного скла можна віднести його високу довговічність, зносостійкість, морозостійкість, а також стійкість до дії кислот та лугів. Використання інкапсулянту, що заповнює повітряний простір всередині фасадних панелей, дозволяє забезпечити захист електронних компонентів від впливу зовнішніх факторів. Враховуючи високу вартість розглянутих фасадних панелей та тривалий термін їхньої експлуатації, зазвичай використовуються сонячні батареї, що мають високу ефективність та тривалий період експлуатації (понад 25 років). Висока надійність та термін експлуатації, довільний дизайн та геометричні параметри дозволяють використовувати сучасні фасадні сонячні панельні системи для створення дизайну широкого спектра споруд та підвищити енергоефективність будівлі в цілому.

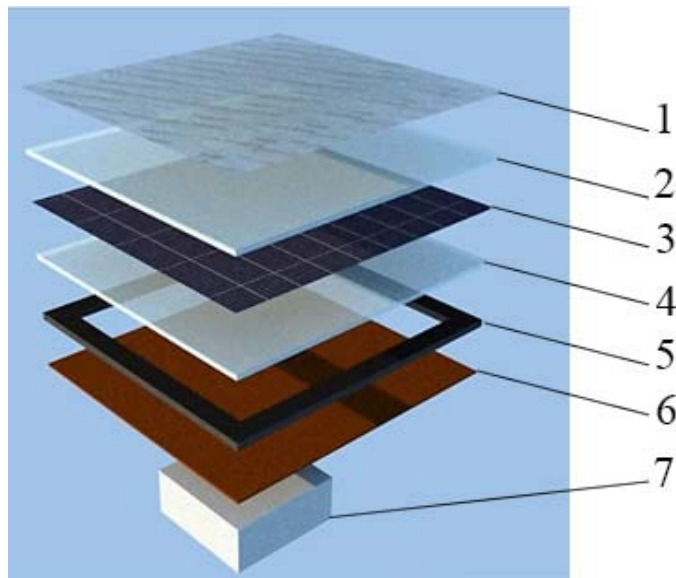


Рис. 3. Будова фасадної сонячної панелі, де 1 – захисне скло; 2 – інкапсулянт; 3 – сонячна батарея; 4 – інкапсулянт; 5 – термічне ущільнення; 6 – захисне скло з керамічним покриттям; 7 – розподільча коробка.

Враховуючи вищезазначене, вбудовані в фасад сонячні батареї можуть стати одним з невід’ємних елементів сучасного фасаду енергоефективних будівель, суттєво не поступаючись у ефективності та ергономічності сонячним батареям, встановленим на дахах будівель.

3. ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ ФАСАД З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

Висока напруженість життя в сучасному місті вимагає створення відповідних рекреаційних зон для жителів міст. Одними з таких зон є центри художньо-естетичної творчості, наприклад, художні школи. Крім забезпечення молодих людей різноманітними можливостями вибору подальшої професійної діяльності відповідно до їх інтересів і здібностей, такі центри можуть стати місцем відпочинку та творчої реалізації для людей всіх вікових груп.

Зазвичай будівлі подібних установ мають в своїй структурі ряд стандартних приміщень, таких як виставковий зал, кабінети живопису, рисунку та скульптури, освітлення яких відіграє визначну роль у сприйнятті та створенні творчих робіт.

Освітлення вважають головною складовою при створенні художнього витвору після наявності таланту у самого митця. Звичайно, найкращим для створення художнього образу є використання природного світла, але його інтенсивність не завжди є достатньою. Особливо проблема загострюється в осінній та зимовий періоди, коли скорочується світловий день, а інтенсивність природного світла зменшується як через зменшення ясних днів, так і через особливості інсоляції, викликані рухом Сонця по більш пологій траєкторії (збільшенням атмосферної маси (рис. 1)). Як наслідок, штучне освітлення має повноцінно замінювати чи доповнювати природне.

Таким чином, при проектуванні художньої школи особливу увагу надають забезпеченню будівлі якісним освітленням. Недостатня освітленість кабінетів не тільки негативно вплине на зір та підвищить втомлюваність, але й не дасть змогу передати яскравість кольорів, падаючі та власні тіні, дрібні елементи композиції. Відповідно до нормативних показників освітлення основних приміщень цивільних будівель [15], освітленість робочих поверхонь кабінетів технічного креслення та малювання має становити 500 лк.

На сьогодні головні критерії, яким має відповідати штучне освітлення – це енергозбереження та енергоефективність, проте для приміщень, в яких відбувається робота з кольором, важливим є, окрім інтенсивності, наближення спектрального складу світла до природного. Для забезпечення високого значення індексу кольоропередачі зазвичай використовують лампи розжарювання або галогенні лампи, що мають наближені до сонячного спектральні характеристики (CRI ~ 100), проте низьку енергетичну ефективність (до 20 лм/Вт). До останнього часу використання світлодіодного освітлення для об'єктів, які потребують високого значення індексу передачі кольору (CRI > 90), було також ускладнено через відносно невисоку (до 80 лм/Вт) ефективність таких світлодіодних освітлювальних систем, при їхній високій вартості. В останні роки ситуація значно покращилася і комерційно доступними є світлодіодні матриці високої потужності зі значеннями індексу передачі кольору понад 90, при ефективності понад 120 лм/Вт. Шляхом подальшого підвищення ефективності таких систем освітлення є комбінування їхнього живлення від мережі загального користування та відновлюваних джерел енергії, наприклад, сонячних батарей, які можуть бути розміщені на фасадах таких будівель.

Для прикладу може бути розглянуто архітектурне рішення реалізації художньої школи. На рис. 4 представлено фасад проєкту художньої школи до та після встановлення на ньому касетних фасадних систем з вбудованими сонячними батареями. Як видно з рисунку, передбачено значне скління фасаду для якомога більш інтенсивного використання природного освітлення, проте залишаються частини будівлі, які дозволяють встановити фасадні системи з вбудованими сонячними батареями. На представленому рисунку за визначених розмірів будівлі може бути встановлено 35 касетних фасадних систем при їхній оптимальній орієнтації.



а



б

Рис. 4. Фасад художньої школи без (а) та з (б) встановленими текстурованими касетними системами.

Використання текстурованих фасадних сонячних панелей [14] дозволяє модифікувати дизайн фасаду художньої школи. Такі системи мають великий спектр кольорів та текстур, що дає змогу гармонійно вписати їх в існуючу фасадну композицію (рис. 4, а). Також можна створити яскраві акценти, що відповідатимуть загальному призначенню будівлі, а саме – образотворчому мистецтву (рис. 4, б).

Розміщення сонячних панелей на фасаді будівлі дозволяє за потреби реалізувати комбінування природного та штучного освітлення робочих приміщень, що підвищує рівномірність результуючого освітлення при збереженні енергоефективності. В той же час відомі системи з безпосереднім використанням енергії, генерованої сонячними батареями, для освітлення внутрішніх приміщень, можуть бути доповнені системами, що використовують надлишкову електроенергію, особливо у літній час, для інших стаціонарних споживачів (системи провітрювання, кондиціонування тощо).

4. ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНОВАНОГО ОСВІТЛЕННЯ

Зазвичай для типового проекту будівлі художньої школи загальна площа приміщень, що потребують освітлення, становить близько 1500 м². Відомі конструкції фасадних систем [16] мають номінальну потужність однієї панелі 145 Вт, а площу – 0,96 м². За сприятливих метеорологічних умов одна така панель може забезпечити живленням освітлення з інтенсивністю понад 500 лк для приміщення площею до 40 м², тому для забезпечення освітлення всіх приміщень будівлі з площею 1500 м² [17], з урахуванням зниження генерування через не оптимальний кут встановлення, необхідно встановити щонайменше 55 таких панелей. Враховуючи значні зміни інсоляції протягом року, на яку в значній мірі чинять вплив погодні умови, максимальна кількість встановлених сонячних батарей точно визначена бути не може – протягом дня ефективність сонячної генерації і протягом кількох хвилин може змінитися більш ніж в 10 разів. Тому оптимальною є компромісна кількість панелей, які можуть ефективно освітлюватися Сонцем протягом більшості днів року та створюють доповнену композицію фасаду.

В реальних умовах найбільш прийнятним є комбінування природного та штучного освітлення. Так, на рис. 5 показано, що при використанні лише природного освітлення виникає нерівномірність розподілу освітлення, таким чином, виникає потреба у використанні штучного освітлення для реалізації рівномірного освітлення приміщення великого розміру (наприклад, виставкового залу), навіть при значній кількості вікон.

Показана на рис. 6 візуалізація освітлення виставкового залу без (а) та з (б) штучним освітленням вказує на більш гармонійне сприйняття такого приміщення.

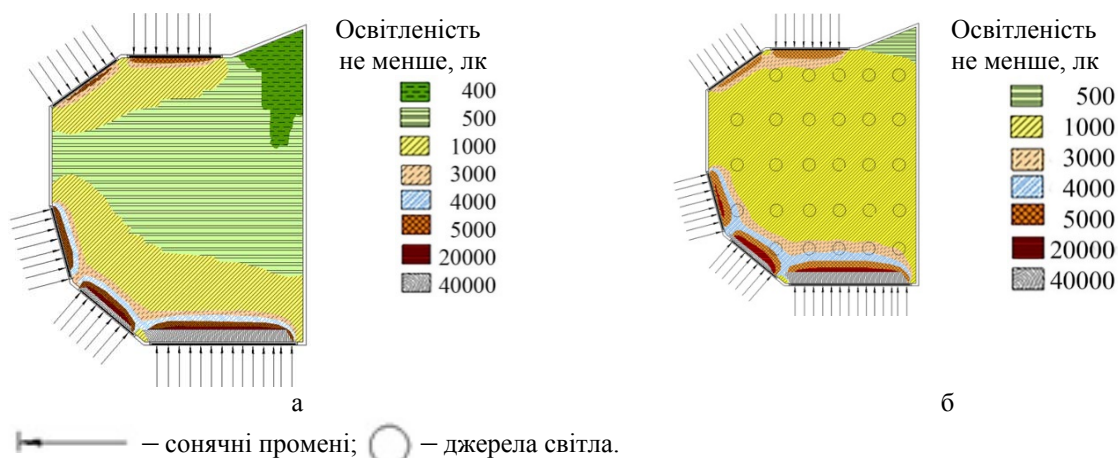


Рис. 5. Розподіл освітленості виставкового залу у випадку використання лише природного(а) та при комбінуванні природного та штучного освітлення(б).



а



б

Рис.6. Освітлення виставкового залу без (а) та з (б) штучним освітленням.

Для оцінки економії від використання подібної системи можна розглянути фасад, показаний на рис. 4, який містить 35 фасадних панелей. Їхня загальна розрахункова потужність генерації протягом року на основі даних спостережень складає для вертикального варіанту встановлення близько 31,5 МВт·год. При цьому використання сучасних світлодіодних систем освітлення з індексом передачі кольору 90+ дозволяє відмовитися від традиційних галогенних ламп, а також здійснювати точкове та акцентне освітлення, комбінувати природне та штучне освітлення, що дозволить спостерігати синергетичний ефект та збільшити енергоефективність системи освітлення.

ВИСНОВКИ

Використання сонячних батарей у вигляді фасадних панелей в дизайні фасадів сучасних будинків дозволяє підвищити енергоефективність їхніх освітлювальних систем. Особливо ефективним є застосування сонячних батарей для комбінованого живлення освітлювальних систем приміщень, які потребують високих рівнів освітлення (500 лк і більше) та вимагають використання додаткового штучного освітлення в денний час.

Увага виробників фасадних систем до інтеграції в їхню будову фотоелектричних модулів вказує на те, що застосування сонячних батарей є невід'ємною частиною сучасних архітектурних рішень. Завдяки високій енергоефективності, естетичності, компактності та головне простоті інтеграції, сонячні батареї все частіше починають використовувати для оздоблення фасадів.

Використання екологічно чистої відновлюваної сонячної енергії для живлення світлодіодних освітлювальних систем дозволить при широкому впровадженні таких систем

значно знизити споживання електроенергії з централізованої електромережі та скоротити використання органічних видів палива на виробництво електроенергії і зменшити кількість шкідливих викидів в атмосферу.

В роботі показано, що за відсутності систем слідкування за Сонцем зменшення генерації складає 23% для випадку горизонтального встановлення сонячних батарей у порівнянні з випадком оптимального кута (для м. Києва 40°) та 40 % для випадку вертикального встановлення сонячних батарей.

Для розглянутого варіанту фасаду художньої школи, на якому можуть бути встановлені сонячні батареї, щорічна економія електроенергії буде складати 31,5 МВт·год за рік.

ПОДЯКА

Автори висловлюють подяку Національному фонду досліджень України за підтримку роботи (проєкт № 2020.01/0216).

I.V. Pekur, V.M. Sorokin, D.V. P Pekur

SOLAR BATTERIES AS AN ELEMENT OF DESIGN OF MODERN ENERGY EFFICIENT BUILDINGS

The concept of increasing the energy efficiency of buildings by placing solar panels on their facades is considered. This solution is evaluated from the point of view of modern urban design, and the possibilities of increasing the energy efficiency of lighting systems of modern buildings with the use of solar panels for their power supply are determined. The implementation of a combination of power from renewable energy sources and from the stationary grid in the absence of energy storage systems (batteries) allows to create systems capable of using almost all the electricity generated by an alternative energy source. In this case, energy losses to energy transportation will be minimal. The absence of such battery systems in the designs allows to install only the design-calculated number of solar panels without the need to make a significant backup of generating capacity for its accumulation or operation in adverse weather conditions. An additional advantage of abandoning energy storage - batteries, is a significant reduction in the use of environmentally hazardous substances such as lead, lithium and acidic or alkaline electrolytes, the production of which has a negative impact on the environment, and their disposal requires additional costs. In the work, it is proposed to use cassette facade systems with built-in solar panels, which allow architects to create a modern appearance of buildings and structures. It is shown that in the absence of solar tracking systems, the reduction in generation is 23% for the case of horizontal expansion of solar panels compared to the case of the optimal angle (for Kyiv 40°) and 40% for the case of vertical installation of solar panels. The analysis indicates the possibility of creating a modern energy-efficient design of building facades, both in the design of modern buildings and in the restoration of facades of existing buildings.

Keywords: lighting systems, facade, solar panels, energy saving, energy efficiency, design, building, LED.

1. Wang Y., Fukuda H. The Influence of Insulation Styles on the Building Energy Consumption and Indoor Thermal Comfort of Multi-Family Residences. *Sustainability*. 2019. **11**, № 1. P. 266. DOI: 10.3390/su11010266.
2. Aelenei L., Gonçalves H. Refurbishment Solutions for Public Buildings Towards Nearly Zero Energy Performance. *Nearly Zero Energy Communities*. 2017. P. 25-38, DOI:10.1007/978-3-319-63215-5_2.
3. Attia S. Net Zero Energy Buildings Performance Indicators and Thresholds. *Net Zero Energy Buildings (NZE)*. 2018. P. 53-85. DOI:10.1016/b978-0-12-812461-1.00003-4.
4. Shankar A., Krishnasamy V., Chitti Babu B. Smart LED lighting system with occupants' preference and daylight harvesting in office buildings. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2020. P. 1-21. DOI:10.1080/15567036.2020.1859650.
5. Коломзаров Ю. В., Костильов В.П., Сорокін В. М., Ніколаєнко Ю. С., Пекур І. В., Корнага В. І., Коркішко Р. М. Екологічні проблеми освітлення та перспективи застосування енергоощадних світлодіодних освітлювальних систем з комбінованим електроживленням. *ТКЕА*. 2020. №1-2. С. 3-9. DOI: 10.15222/ТКЕА2020.5-6.03.

6. Inhoffen J., Siemroth C., Zahn P. Minimum Prices and Social Interactions: Evidence from the German Renewable Energy Program. *SSRN Electronic Journal*. 2016. DOI:10.2139/ssrn.2796130.
7. PHOTOVOLTAICS REPORT. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (16 September 2020).
8. Проблеми і перспективи розвитку співробітництва між країнами Юго-Східної Європи в межах Чорноморського економічного співробітництва і ГУАМ. Збірник наукових праць. Лівадія-Донець: ДонНУ, 2007. 766 с.
9. National Energy and Climate Plans: A solar-powered energy system by 2030. *SolarPower Europe*. URL: <https://www.solarpowereurope.org/national-energy-and-climate-plans-a-solar-powered-energy-system-by-2030> (дата звернення: 02.03.2021).
10. Вже близько 30 тис. родин в Україні перейшли на сонячні електростанції та заощаджують витрати на комунальні послуги. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України: веб-сайт. URL: <https://sae.gov.ua/uk/news/3648>. (дата звернення: 02.03.2021).
11. Wenham S.R., Green M.A., Watt M.E., Corkish R. APPLIED PHOTOVOLTAICS. Earthscan: 2007. 323 p. ISBN 978-1-84407-401-3
12. Meinel, A.B. & Meinel, M.P. Applied Solar Energy: An Introduction, Addison Wesley Publishing, 1976.
13. NASA POWER Data Access Viewer. NASA. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (дата звернення: 02.07.2021).
14. Liberta Solar. Інженерно-будівельна компанія Rauta: веб-сайт. URL: <https://rautagroup.com/uk/product/liberta-solar-uk/> (дата звернення: 02.03.2021).
15. ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення», чинний від-22.08.2019. №106.Київ, Державні будівельні норми України. 2018.
16. Фасадные солнечные панели, имитирующие дерево, мрамор и кирпич – новый продукт *Heliartec Solutions*. URL: <https://ecotechnica.com.ua/energy/solntse/4834-fasadnye-solnechnye-paneli-imitiruyushchie-derevo-mramor-i-kirpich-novuyj-produkt-heliartec-solutions.html> (дата звернення: 02.03.2021).
17. Відновлювані джерела енергії. За заг. ред. С.О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ. 2020. 392 с.

Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
41, проспект Науки,
03680 Київ, Україна
E-mail: ilona.pekur@gmail.com, vsorokin@isp.kiev.ua, demid.pekur@gmail.com

Отримано 05.10.2021