

## ТЕХНІЧНИЙ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОЇ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ОСВІТЛЕННЯ

Отримано 12 лют. 2026 р.; рекомендовано до публікації 26 чер. 2026 р.  
Доступно онлайн 30 чер. 2026 р.

Рубаненко О. О.<sup>1</sup>, Аліпатова М. Р.<sup>2</sup>

Автор для кореспонденції: Аліпатова Марія,  
e-mail: maria.alipatova@gmail.com

**Анотація.** Ця стаття представляє технічний, експериментальний та статистичний аналіз інноваційної оптичної сонячної системи освітлення індустріальних центрів та критичної інфраструктури. Розробка запропонованої автономної малопотужної системи є критичним пріоритетом у контексті національних цілей України щодо енергетичної децентралізації та підвищення стійкості інфраструктури, оскільки на освітлення промислових об'єктів може припадати до 20–40 % загального споживання електроенергії. Система призначена для подолання недоліків попередніх конструкцій, як-от нестабільність світлового потоку, нерівномірна передача світла та зниження ефективності через розсіювання світла.

Експерименти, проведені в Берлінському університеті прикладних наук з використанням сонячного симулятора [1, 11] зі стандартизованим опроміненням  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , були зосереджені на кількісній оцінці впливу кута нахилу сонячного колектора на переданий світловий потік. Дані статистичного аналізу, проведеного за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA), підтвердили гіпотезу, що кут нахилу має статистично значущий вплив на вихідний світловий потік.

Отримані результати показали, що кутове зміщення спричиняє різке падіння ефективності: якщо кут нахилу змінюється від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , світловий потік знижується, відповідно, з 57,7 люменів до приблизно 0,008 люменів. Ці висновки підтверджують, що для забезпечення практичної життєздатності та оптимальної продуктивності системи в реальних умовах необхідне впровадження автоматичного механізму сонячного відстеження, який динамічно коригуватиме положення концентратора. Попри підвищення механічної складності, капітальних витрат і енергоспоживання, це необхідна умова для великомасштабних або критично важливих застосувань.

**Ключові слова:** децентралізація, кут нахилу концентратора, світловий потік, однофакторний дисперсійний аналіз, механізм сонячного відстеження.

**Вступ.** Повномасштабні атаки на енергетичну інфраструктуру України спричинили безпрецедентні втрати енергетичних потужностей і стійкі дефіцити електроенергії в пікові періоди. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства (IEA), станом на 2024 рік майже дві третини генерації були окуповані, пошкоджені або знищені, а в березні – липні 2024 року додатково втрачено близько 9,2 ГВт, здебільшого теплової та гідрогенерації [8, 10]. За прогнозом IEA, узимку 2025–2026 років попит у піку може сягнути  $\sim 18,5$  ГВт, а балансний дефіцит – до 6 ГВт, попри імпорт електроенергії з континентальної Європи. Ліміти імпорту було поступово розширено (до 1,7 ГВт у 2024 році, з подальшим збільшенням до 2,1 ГВт з 1 грудня 2024 року), однак цього недостатньо, щоб компенсувати втрату великої централізованої генерації та обмеження мережевої інфраструктури.

В умовах продовжуваних загроз і необхідності швидкого [7, 8] відновлення IEA пропонує стратегічний зсув

до децентралізованої моделі впровадження розподілених енергетичних ресурсів (DER): дахових та наземних СЕС/ВЕС, акумуляторів, малих модульних газових турбін і газопоршневих агрегатів, які генерують поруч із центрами споживання, зменшуючи вразливість до цілеспрямованих ударів і втрати під час транспортування електроенергії. Моделювання IEA показує, що комбінування DER (наприклад, СЕС + вітрова генерація + накопичувачі) допоможе: (i) забезпечити потреби енергетичної системи, (ii) будувати стратегію до 2030 року відповідно до євроінтеграційного курсу, (iii) знижувати системні витрати за рахунок економії палива та імпорту.

Водночас масштабування DER потребує узгоджених регуляторних і ринкових реформ: формування візії та дорожньої карти децентралізації, удосконалення правил доступу DER до ринків електроенергії та допоміжних послуг, оновлення мережевих вимог до приєднання, а також механізмів фінансування [3]. Окремого значення

<sup>1</sup> магістр

<https://orcid.org/0009-0000-0857-6870>

<sup>2</sup> д-р. техн. наук, професор

<https://orcid.org/0000-0002-2660-182X>

<sup>1,2</sup> Інститут відновлюваної енергетики  
НАН України, м. Київ, Україна

<sup>1</sup> Західночеський університет в Пльзні,  
Пльзень, Чехія

<sup>1</sup> Вінницький національний технічний  
університет, Вінниця, Україна

набувають міські критичні навантаження, які мають працювати навіть за умов дефіциту потужності та пошкоджень мереж: лікарні, водоканали, об'єкти зв'язку, логістичні центри [2, 12].

За міжнародними енергоаудитами, освітлення може становити 20–40 % [8, 10] електроспоживання промислових будівель; при централізованому живленні воно є вразливим до відключень і коливань якості електроенергії. Це створює нішу для інноваційних світлотехнічних рішень, що зменшують залежність від мережі вдень і гарантують потрібну освітленість для безпечної роботи виробництв і складів.

У цій роботі як приклад такого рішення розглядається нова технологія – волоконно-оптична сонячна система денного освітлення з електронним зворотним зв'язком, здатна підтримувати сталу освітленість у приміщеннях незалежно від погодних умов [6]. Система концентрує сонячне випромінювання за допомогою збиральних лінз, передає світловий потік полімерним оптичним волокном великого діаметра до внутрішнього дифузійного модуля, де датчик освітленості й штучне джерело автоматично добирають нестачу світла до заданого рівня – тобто реалізується гібрид «природне + штучне світло» із замкненим керуванням. На відміну від традиційних дзеркальних концентраторів і пучків тонких волокон, така архітектура усуває міжволоконні зазори та зменшує розсіювання, забезпечує рівномірніший світловий профіль і меншу деградацію від пилу / вологи.

**Мета дослідження:**(1) обґрунтувати потребу в зменшенні споживання електроенергії на освітлення, що є заходом декарбонізації на основі актуальних досліджень IEA; (2) показати техніко-експериментальну спроможність технології для промислового / логістичного денного освітлення; (3) довести теоретичну спроможність установки бути ефективною для інтеграції в децентралізовану енергетичну систему.

### 1. Обґрунтування потреби в децентралізації міських енергосистем

Актуальні оцінки Міжнародного енергетичного агентства (IEA) свідчать, що традиційна централізована модель енергопостачання, побудована на великих генерувальних об'єктах і протяжних магістральних мережах, є вкрай вразливою в умовах воєнних загроз та цілеспрямованих атак [2]. Згідно з аналітичними звітами IEA, у 2022–2024 роках значна частина електрогенерації України була виведена з ладу саме через ураження великих теплових електростанцій, гідроелектростанцій і високовольтних підстанцій, що призвело до системних дефіцитів потужності та необхідності впровадження графіків обмеження споживання в містах [5, 10].

У відповідь на ці виклики IEA рекомендує [7] Україні стратегічний зсув до децентралізованої моделі, що передбачає розміщення генерувальних потужностей безпосередньо поблизу споживача. Такий підхід дає змогу зменшити залежність від магістральних мереж, скоротити втрати під час передавання електроенергії та суттєво підвищити стійкість міських енергосистем.

Практика європейських країн показує, що навіть часткова децентралізація – у вигляді міських мікромереж, локальних сонячних електростанцій і систем накопичення дає змогу підтримувати критичні навантаження в автономному або напівавтономному режимі у разі аварій у загальнонаціональній мережі.

Особливо гостро проблема централізованого енергопостачання проявляється у великих містах, де зосереджена промислова, логістична та соціальна інфраструктура. Для таких об'єктів характерне значне базове електричне навантаження, яке формується не лише технологічним обладнанням, але й системами освітлення [2, 5]. За даними міжнародних енергоаудитів та галузевих досліджень, частка освітлення в електроспоживанні промислових і логістичних об'єктів становить у середньому 20–40 %, а в окремих типах складських комплексів з великими площами і високими вимогами до освітленості може перевищувати 50 % у денний період (рис. 1).



Рис. 1. Середнє споживання електроенергії в промислових будівлях

В умовах дефіциту електроенергії такі навантаження стають критичними. Наприклад, для логістичного центру площею 10–20 тис. м<sup>2</sup> встановлена потужність систем освітлення може становити 80–150 кВт. У разі аварійного обмеження електропостачання відключення або зниження рівня освітлення безпосередньо впливає на безпеку персоналу, роботу складської техніки та безперервність логістичних операцій. Аналогічна ситуація характерна для виробничих цехів, де нормативні вимоги до освітленості (300–750 лк) є обов'язковою умовою експлуатації.

З огляду на це децентралізація міських енергосистем має розглядатися не лише як нарощування локальної генерації та накопичення енергії, але і як активне управління попитом та зменшення електричних навантажень у години пікового споживання [5]. Використання природних енергетичних ресурсів, зокрема сонячного світла для денного освітлення, є одним з найефективніших і технологічно простих інструментів досягнення цієї мети.

Європейський досвід, на який посилається ІЕА, демонструє, що завдяки інтеграції систем денного освітлення у промислові та громадські будівлі можна знизити загальне електроспоживання будівель на 10–25 %, а в окремих сценаріях – ще більше, за рахунок зменшення навантаження саме в денні години. Для України, де дефіцит потужності має яскраво виражений денний характер через роботу промисловості та інфраструктури, цей ефект набуває особливої цінності [8].

Таким чином, децентралізація міських енергосистем повинна включати комплексний підхід, що поєднує локальну генерацію, системи накопичення, інтелектуальне керування навантаженням і використання природних енергетичних ресурсів. У цьому контексті системи сонячного денного освітлення можуть розглядатися як повноцінний елемент Distributed Energy Resources, що сприяє підвищенню енергетичної безпеки міст і стійкості критичної інфраструктури в умовах сучасних загроз.

## 2. Матеріали та методи

Запропонована волоконно-оптична сонячна система денного освітлення базується на принципі концентрації сонячного випромінювання з подальшим передаванням світлового потоку за допомогою одного суцільного полімерного оптичного волокна великого діаметра (10–12 мм) (рис. 2). Такий підхід принципово відрізняється від традиційних рішень, у яких використовуються пучки тонких волокон або дзеркальні концентратори, і дає змогу усунути низку фундаментальних недоліків, характерних для існуючих систем.

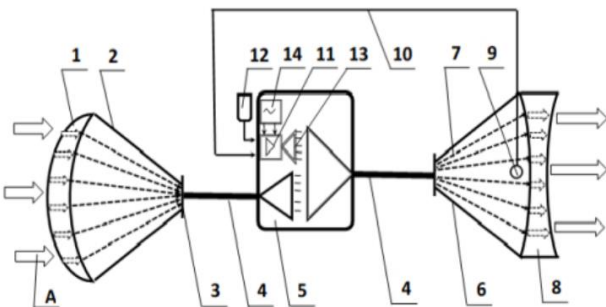


Рис. 2. Сонячна оптична система: лінза Френзеля (1); корпус концентратора (2); тримач (3); полімерне оптичне волокно (POF) (4); підсилювач світла (5); відбивний пристрій (6); система дифузії (7); дифузійна лінза (8); датчик інтенсивності світла (9); система зворотного зв'язку (10); електронна система управління (11); еталонний датчик (12); пристрій штучного освітлення (13); джерело електроживлення (14)

Використання одного великодiameterного волокна забезпечує відсутність міжволоконних зазорів, що є основним джерелом паразитного розсіювання світла в багатожильних пучках. Це дає змогу істотно зменшити оптичні втрати під час введення світлового потоку в світлопровідний канал та сформувати однорідний

світловий профіль по всій площі вихідної апертури. З інженерного погляду така конструкція підвищує світлопередавальну здатність системи та спрощує її механічну інтеграцію в будівельні конструкції промислових і логістичних об'єктів [6].

Для експериментальної перевірки працездатності та ефективності системи було використано спеціалізований випробувальний стенд для сонячних колекторів Берлінського університету прикладних наук, який дає змогу проводити дослідження в умовах повністю контрольованого сонячного випромінювання (рис. 3). Сонячний симулятор, побудований на базі металогалогенних ламп типу ATLAS MTT «Solar Constant 4000», забезпечував спектральні характеристики та однорідність опромінення відповідно до стандартів EN 12975, ISO 9806 та ASTM G173 [1, 4, 9].



Рис. 3. Сонячний симулятор Solar Constant 4000

Інтенсивність випромінювання в зоні встановлення оптичного колектора підтримувалася на рівні  $1000 \text{ Вт/м}^2$  (AM1.5) з часовою стабільністю  $\pm 1 \%$ , що давало змогу порівнювати результати різних серій вимірювань без впливу зовнішніх факторів [11].

Особливу увагу в експериментальному дослідженні було приділено впливу кута нахилу концентратора на величину переданого світлового потоку (рис. 4). Кут змінювався в діапазоні від  $0^\circ$  до  $90^\circ$  з кроком  $3^\circ$ , що

відображає реальні сценарії зміни положення Сонця та можливі відхилення під час монтажу системи на будівлях.



Рис. 4. Встановлення конструкції на сонячному симуляторі

Отримані експериментальні дані показали, що світлова віддача системи є високочутливою до геометричного положення концентратора (таблиця). Максимальні значення світлового потоку спостерігалися в області малих кутів, тоді як зі збільшенням кута відбувалося різке зниження ефективності введення світла у волоконно-оптичний канал. Цей ефект є характерним для оптичних концентраційних систем і підтверджує необхідність або точної геометричної оптимізації, або використання активних компенсуючих механізмів.

Таблиця. Набір даних спостережень

Кут нахилу до джерела освітлення	Освітленість (люмен)	Категорія
0–3	57,7–55,–1	Високий
6–9	31,913–28.2	Середній
12–15	17., 5–15,2	Низький
18–90	9,–762–0,008	Дуже низький

### 3. Результати

Для кількісного підтвердження отриманих закономірностей було застосовано однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA). Аналіз показав статистично значущий вплив кута нахилу концентратора на світлову віддачу системи ( $p < 0,05$ ), що виключає випадковий характер

спостережуваних відмінностей між експериментальними групами.

Таким чином, ANOVA не лише підтвердив фізичні закономірності процесу оптичної концентрації, але й надав формальне статистичне обґрунтування для застосування електронної системи зворотного зв'язку, яка дає змогу стабілізувати рівень освітленості автоматичним додаванням штучного світла у випадках зменшення природного світлового потоку.

Окремим етапом досліджень була оцінка теплової стійкості конструктивних елементів системи (рис. 5). Компоненти, виготовлені з різних матеріалів (PLA, ABS, CPE), а також вузол введення оптичного волокна, піддавалися опроміненню з інтенсивністю  $1000 \text{ Вт/м}^2$  протягом контрольованого часу. Температурні поля фіксувалися за допомогою тепловізійної камери та контактних датчиків.

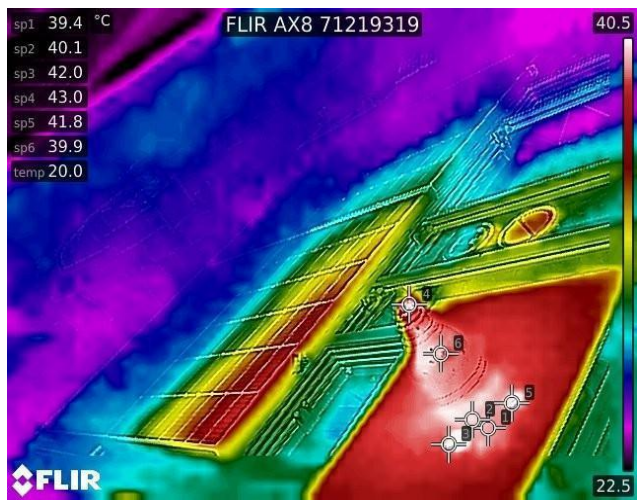


Рис. 5. Визначення температури всередині корпусу концентратора

Результати показали, що температури елементів не перевищують допустимих значень і не призводять до термічної деградації матеріалів, що підтверджує можливість тривалої експлуатації системи в реальних умовах сонячного опромінення без ризику перегріву або втрати оптичних властивостей.

Сукупність отриманих експериментальних і статистичних результатів свідчить про те, що запропонована волоконно-оптична сонячна система:

- забезпечує рівномірний і стабільний світловий потік;
- має підтверджену експериментально світлову ефективність;
- демонструє термічну та конструктивну надійність; є придатною для інтеграції в промислові та логістичні приміщення з високими вимогами до якості денного освітлення.

На основі отриманих результатів система демонструє високу техніко-експериментальну спроможність і може розглядатися як перспективний світлотехнічний

компонент децентралізованих енергетичних рішень для міської інфраструктури.

Обмеженнями дослідження є лабораторний характер випробувань, відсутність довготривалих польових вимірювань та впливу забруднення оптичних елементів. Подальші дослідження будуть спрямовані на валідацію системи в реальних кліматичних умовах.

### Висновки

У статті комплексно розглянуто проблему енергетичної стійкості міських енергосистем України в умовах воєнних загроз та тривалого дефіциту генерувальних потужностей. На основі актуальних аналітичних оцінок Міжнародного енергетичного агентства (IEA) обґрунтовано необхідність переходу від традиційної централізованої моделі енергопостачання до децентралізованих рішень, орієнтованих на локальну генерацію, накопичення енергії та активне управління навантаженням на рівні міських мікромереж.

Показано, що поряд з класичними DER (сонячні та вітрові електростанції, акумуляторні системи, резервна генерація) важливу роль у децентралізованих енергосистемах можуть відігравати світлотехнічні рішення, спрямовані на зменшення електричного навантаження в денний період. Особливо це актуально для промислових і логістичних об'єктів, де освітлення формує значну частку електроспоживання і є критичною умовою безпечної експлуатації.

У роботі експериментально досліджено волоконно-оптичну сонячну систему денного освітлення з використанням одного великодіаметрального полімерного оптичного волокна та електронного зворотного зв'язку. Лабораторні випробування, виконані на стенді для сонячних колекторів у контрольованих умовах (AM1.5, 1000 Вт/м<sup>2</sup>), підтвердили технічну спроможність системи забезпечувати рівномірний та стабільний світловий потік. Статистичне дослідження методом однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) показало статистично значущий вплив геометрії концентратора на світлову віддачу, що обґрунтовує необхідність оптимізації оптичної частини та застосування активного електронного керування.

Запропоновано архітектуру комбінованого енерго-світлотехнічного вузла, інтегрованого в міську мікромережу разом з іншими DER. Така система дає змогу зменшити електричне навантаження на освітлення в денні години, підвищити автономність і надійність об'єктів критичної інфраструктури та сприяти формуванню стійких децентралізованих енергосистем.

Отримані результати є релевантними не лише для України в умовах воєнного часу та післявоєнної відбудови, але й для країн Європейського Союзу в контексті реалізації стратегій енергетичної безпеки, розвитку мікромереж та досягнення кліматичних цілей Net Zero.

### ПОСИЛАННЯ

1. ASTM G173-03(2020) (2020) Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
2. European Commission (2018) Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), European Commission, Brussels.
3. European Commission (2020) A Renovation Wave for Europe – Greening our Buildings, European Commission, Brussels.
4. EN 12975-2:2006 (2006) Thermal solar systems and components – Solar collectors – Test methods, European Committee for Standardization.
5. Green Deal Ukraine (2024) Decentralized Energy Solutions for Urban Resilience, Green Deal Ukraine, Kyiv.
6. Yakymchuk M., Alipatova M. (2024) Solar energy system, Patent of Ukraine No. 155842, IPC F03G6/06, H01L31/04, published 17.04.2024, Bulletin No. 16/2024.
7. International Energy Agency (IEA) (2023) Distributed Energy Resources: Powering a Secure Energy Transition, International Energy Agency, Paris.
8. International Energy Agency (IEA) (2024) Ukraine's Energy Security and the Coming Winter, International Energy Agency, Paris.
9. ISO 9806:2017 (2017) Solar energy – Solar thermal collectors – Test methods, International Organization for Standardization, Geneva.
10. Kyiv School of Economics (2024) Energy Infrastructure Damage Assessment in Ukraine, Kyiv School of Economics, Kyiv.
11. Labor für konventionelle und erneuerbare Energien, Berliner Hochschule für Technik (2023) Solarenergie – Leistungsprüfstand für Solarkollektoren, labor.bht-berlin.de/kee/solarenergie
12. UNDP (2023) Towards a Green Transition of the Energy Sector in Ukraine, United Nations Development Programme, Kyiv.

## TECHNICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF FIBER-OPTICAL SOLAR LIGHTNING SYSTEMS

Received Feb. 12, 2026; accepted Jun. 26, 2026

Available online June. 30, 2026

Rubanenko O.<sup>1</sup>, Alipatova M.<sup>2</sup>Author for correspondence: Alipatova Mariia,  
e-mail: maria.alipatova@gmail.com

**Abstract.** *This article presents a technical, experimental, and statistical analysis of a new lighting system designed for industrial buildings and critical infrastructure. The development of this autonomous, low-power system is a priority in the context of Ukraine's national objectives for energy decentralization and enhancing infrastructure resilience, as lighting can account for up to 20–40% of electricity consumption in industrial facilities. The system is designed to overcome the disadvantages of previous designs, such as highly unstable luminous flux, non-uniform light transmission, and reduced efficiency due to light scattering. Experiments were conducted at the Berlin University of Applied Science using a solar simulator [1, 11] with a standardized irradiance level of 1000 W/m<sup>2</sup>. These tests focused on quantifying how the tilt angle of the solar collector influences the transmitted luminous flux. Statistical analysis, performed using a one-way analysis of variance (ANOVA), unequivocally proved that the tilt angle has a statistically significant impact on the output luminous flux.*

*The results showed that efficiency drops sharply with angular displacement: the luminous flux decreases from 57.7 lumens at 0° tilt to approximately 0.008 lumens at 90°. These findings confirm that, to ensure the practical viability and optimal performance of the system in real-world conditions, the implementation of an automated solar tracking mechanism, which dynamically adjusts the concentrator's position, is necessary. While adopting tracking entails trade-offs, such as increased mechanical complexity, higher capital costs, and greater energy consumption, it is a necessary condition for large-scale or mission-critical applications.*

**Keywords:** *Energy decentralization, concentrator tilt angle, luminous flux, one-way analysis of variance, automated solar tracking mechanism.*

**Introduction.** Large-scale attacks on Ukraine's energy infrastructure have caused unprecedented losses of generation capacity and persistent electricity shortages during peak periods. According to the International Energy Agency (IEA), as of 2024, nearly two-thirds of generation capacity had been occupied, damaged, or destroyed, while an additional 9.2 GW—primarily thermal and hydropower generation—was lost between March and July 2024 [8, 10]. According to IEA projections, peak demand in the winter of 2025/2026 may reach approximately 18.5 GW, with a supply deficit of up to 6 GW, despite electricity imports from continental Europe. Import limits have been gradually expanded (to 1.7 GW in 2024, with a further increase to 2.1 GW from 1 December 2024), yet this remains insufficient to compensate for the loss of large-scale centralized generation and the constraints of grid infrastructure.

Amid ongoing threats and the urgent need for rapid recovery, the IEA proposes a strategic shift toward a decentralized model—namely, the deployment of distributed energy resources (DER): rooftop and ground-mounted solar and wind power plants, battery storage systems, small modular gas turbines, and gas engine units. These systems generate

electricity close to consumption centers, thereby reducing vulnerability to targeted attacks and transmission losses. IEA modelling indicates that combining DER (e.g., solar PV + wind generation + energy storage) can: (i) meet the operational needs of the energy system, (ii) support the development of a strategy toward 2030 in line with European integration objectives, and (iii) reduce system costs through fuel savings and decreased import dependency.

At the same time, scaling up DER requires coordinated regulatory and market reforms: the development of a clear vision and roadmap for decentralization, improved market access rules for DER participation in electricity and ancillary services markets, updated grid connection requirements, and enhanced financing mechanisms [3]. Particular importance is attached to urban critical loads that must operate even under conditions of capacity shortages and network damage, including hospitals, water utilities, communication facilities, and logistics centers [2, 12].

According to international energy audits, lighting can account for 20–40% [8, 10] of electricity consumption in industrial buildings; under centralized supply, it is vulnerable

<sup>1</sup> Postgraduate<https://orcid.org/0009-0000-0857-6870><sup>2</sup> Dr. of Tech. Sciences<https://orcid.org/0000-0002-2660-182X><sup>1, 2</sup> Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine<sup>1</sup> University of West Bohemia in Pilsen, Pilsen, Czech Republic<sup>1</sup> Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

to outages and power quality fluctuations. This creates a niche for innovative lighting solutions that reduce grid dependency during daytime and ensure the required level of illuminance for safe operation of industrial and warehouse facilities.

In this study, such a solution is exemplified by a novel technology—an optical fiber solar daylighting system with electronic feedback control, capable of maintaining stable indoor illuminance regardless of weather conditions [6]. The system concentrates solar radiation using collecting lenses, transmits the luminous flux through a large-diameter polymer optical fiber to an indoor diffusion module, where an illuminance sensor and an artificial light source automatically compensate for any deficit to a predefined level—thus implementing a hybrid “natural + artificial lighting” scheme with closed-loop control. Unlike traditional mirror-based concentrators and bundles of thin fibers, this architecture eliminates inter-fiber gaps and reduces scattering, providing a more uniform light distribution and lower degradation due to dust and moisture.

**The objectives of the study are:** (1) to substantiate the need to reduce electricity consumption for lighting as a decarbonization measure based on current IEA research; (2) to demonstrate the technical and experimental feasibility of the technology for industrial and logistics daylighting applications; (3) to prove the theoretical capability of the system to be effectively integrated into a decentralized energy system.

### 1. Justification for the need to decentralize urban energy systems

Current assessments by the International Energy Agency (IEA) indicate that the traditional centralized energy supply model, based on large-scale generation facilities and extensive transmission networks, is highly vulnerable under conditions of military threats and targeted attacks [2]. According to IEA analytical reports, in 2022–2024, a significant share of Ukraine’s electricity generation capacity was disabled precisely due to damage to large thermal power plants, hydropower plants, and high-voltage substations, resulting in systemic capacity deficits and the need to implement consumption restriction schedules in urban areas [5, 10].

In response to these challenges, the IEA recommends [7] that Ukraine pursue a strategic shift toward a decentralized model, which involves deploying generation capacities in close proximity to consumers. Such an approach reduces dependence on transmission networks, minimizes electricity transmission losses, and significantly enhances the resilience of urban energy systems. The experience of European countries demonstrates that even partial decentralization—through urban microgrids, local solar power plants, and energy storage systems—enables the supply of critical loads in autonomous or semi-autonomous modes during disruptions in the national grid.

The issue of centralized energy supply is particularly acute in large cities, where industrial, logistics, and social

infrastructure are concentrated. These facilities are characterized by substantial base electrical loads, formed not only by process equipment but also by lighting systems [2, 5]. According to international energy audits and sectoral studies, illumination accounts on average for 20–40% of electricity consumption in industrial and logistics facilities (see Fig. 1), and in certain types of large-scale warehouses with high illuminance requirements, this share may exceed 50% during daytime operation.

Under conditions of electricity shortages, such loads become critical. For example, in a logistics center with an area of 10,000–20,000 m<sup>2</sup>, the installed capacity of lighting systems may reach 80–150 kW. In the event of emergency power limitations, the shutdown or reduction of lighting levels directly affects personnel safety, the operation of warehouse equipment, and the continuity of logistics processes. A similar situation is observed in industrial workshops, where regulatory illuminance requirements (300–750 lx) constitute a mandatory condition for safe and efficient operation.

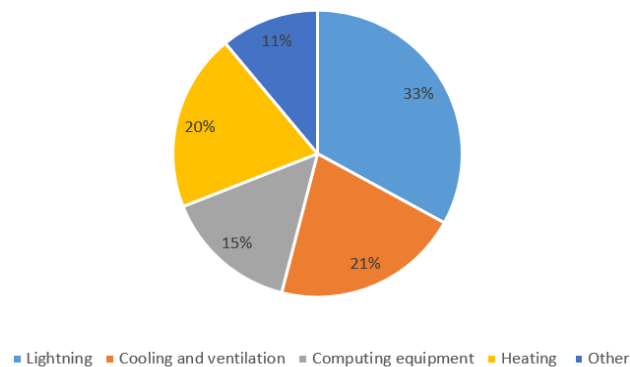


Fig. 1. Average electricity consumption in industrial buildings

In this context, the decentralization of urban energy systems should be considered not only as the expansion of local generation and energy storage, but also as the active management of demand and the reduction of electrical loads during peak consumption periods [5]. The use of natural energy resources, particularly solar radiation for daylight illumination, represents one of the most efficient and technologically simple tools for achieving this objective.

European experience, as referenced by the IEA, demonstrates that the integration of daylighting systems into industrial and public buildings can reduce total electricity consumption by 10–25%, and in certain scenarios even more, primarily by lowering loads during daytime hours. For Ukraine, where capacity shortages exhibit a pronounced daytime pattern due to industrial and infrastructure activity, this effect is of particular importance [8].

Thus, the decentralization of urban energy systems should involve a comprehensive approach that combines local generation, energy storage systems, intelligent demand-side management, and the utilization of natural energy resources. In this context, solar daylighting systems can be

considered as elements of Distributed Energy Resources (DER), contributing to enhanced urban energy security and the resilience of critical infrastructure under modern threat conditions.

## 2. Materials and Methods

The proposed optical fiber solar daylighting system is based on the principle of concentrating solar radiation followed by the transmission of the luminous flux through a single continuous large-diameter (10–12 mm) polymer optical fiber (see Fig. 2). This approach fundamentally differs from conventional solutions that utilize bundles of thin fibers or mirror-based concentrators and allows for the elimination of several inherent drawbacks characteristic of existing systems.

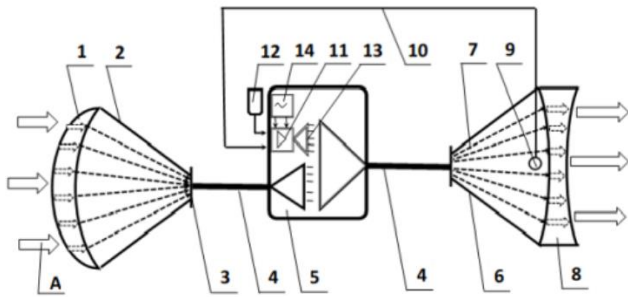


Fig. 2. Solar optical system

Fresnel lens (1); concentrator housing (2); holder (3); polymer optical fiber (POF) (4); light amplifier (5); reflecting device (6); diffusion system (7); diffusing lens (8); light intensity sensor (9); feedback system (10); electronic control system (11); reference sensor (12); artificial lighting device (13); power supply unit (14)

The use of a single large-diameter fiber eliminates inter-fiber gaps, which are the primary source of light scattering in multi-fiber bundles. This significantly reduces optical losses during coupling of the luminous flux into the light-guiding channel and enables the formation of a uniform light profile across the entire output aperture. From an engineering perspective, such a design enhances the light transmission capacity of the system and simplifies its mechanical integration into the building structures of industrial and logistics facilities [6].

To experimentally validate the operability and efficiency of the system, a specialized solar collector test bench at the Berlin University of Applied Sciences was employed, enabling investigations under fully controlled solar radiation conditions (see Fig. 3). The solar simulator, based on metal halide lamps of the ATLAS MTT “Solar Constant 4000” type, provided spectral characteristics and irradiance uniformity in accordance with EN 12975, ISO 9806, and ASTM G173 standards [1, 4, 9].

The irradiance intensity in the optical collector installation zone was maintained at a level of  $1000 \text{ W/m}^2$  (AM1.5) with a temporal stability of  $\pm 1\%$ , which ensured comparability of

results across different measurement series without the influence of external factors [11].



Fig. 3. Solar simulator Solar Constant 4000

Particular attention in the experimental study was given to the effect of the concentrator tilt angle on the magnitude of the transmitted luminous flux (see Fig. 4). The angle was varied within a range from  $0^\circ$  to  $90^\circ$  in  $3^\circ$  increments, reflecting real-world scenarios of solar position changes as well as possible deviations during system installation on buildings.



Fig. 4. Installation of the system on the solar simulator

The obtained experimental data demonstrated that the luminous efficiency of the system is highly sensitive to the geometric position of the concentrator (see Table). Maximum luminous flux values were observed at small tilt angles, whereas a significant decrease in light coupling efficiency into the fiber-optic channel occurred with increasing angle. This effect is characteristic of optical concentration systems and confirms the necessity of either precise geometric optimization or the implementation of active compensation mechanisms.

**Table. Dataset of observations**

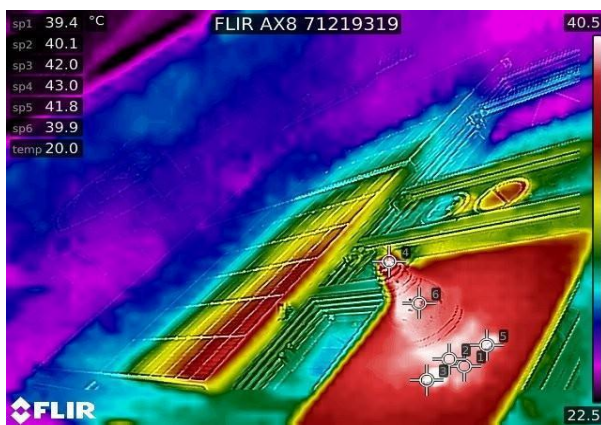
Tilt angle relative to light source	Illuminance (lumens)	Category
0 - 3	57.7 - 55.1	High
6 - 9	31.913 - 28.2	Medium
12 - 15	17.65 - 15.2	Low
18 - 90	9.762 - 0.008	Very low

### 3. Results

To quantitatively validate the observed patterns, a one-way analysis of variance (ANOVA) was applied. The analysis revealed a statistically significant effect of the concentrator tilt angle on the luminous efficiency of the system ( $p < 0.05$ ), thereby excluding the random nature of the differences observed between the experimental groups.

Thus, ANOVA not only confirmed the physical principles of the optical concentration process but also provided formal statistical justification for the implementation of an electronic feedback control system. This system enables the stabilization of illuminance levels by automatically supplementing artificial light in cases where the natural luminous flux decreases.

An additional stage of the study involved evaluating the thermal stability of the system's structural components (see Fig. 5). Elements manufactured from various materials (PLA, ABS, CPE), as well as the optical fiber coupling unit, were exposed to irradiation at an intensity of  $1000 \text{ W/m}^2$  over a controlled period. Temperature fields were recorded using a thermal imaging camera and contact sensors.



*Fig. 5. Temperature measurement inside the concentrator housing*

The results showed that the temperatures of the components did not exceed permissible limits and did not cause thermal degradation of the materials, confirming the feasibility of long-term system operation under real solar irradiation conditions without the risk of overheating or loss of optical properties.

The combination of experimental and statistical results indicates that the proposed optical fiber solar system:

- provides a uniform and stable luminous flux;
- has experimentally validated lighting efficiency;
- demonstrates thermal and structural reliability;
- is suitable for integration into industrial and logistics facilities with high requirements for daylighting quality.

Based on the obtained results, the system demonstrates high technical and experimental feasibility and can be considered a promising lighting component within decentralized energy solutions for urban infrastructure. The limitations of the study include the laboratory nature of the experiments, the absence of long-term field measurements, and the lack of assessment of contamination effects on optical elements. Further research will focus on validating the system under real climatic conditions.

### Conclusion

The paper comprehensively addresses the problem of energy resilience of urban energy systems in Ukraine under conditions of military threats and a prolonged deficit of generation capacity. Based on up-to-date analytical assessments of the International Energy Agency (IEA), the necessity of transitioning from a traditional centralized energy supply model to decentralized solutions has been substantiated, focusing on local generation, energy storage, and active demand-side management at the level of urban microgrids.

It has been demonstrated that, alongside conventional Distributed Energy Resources (DER) such as solar and wind power plants, battery storage systems, and backup generation, lighting technologies aimed at reducing electrical loads during daytime can play a significant role in decentralized energy systems. This is particularly relevant for industrial and logistics facilities, where lighting constitutes a substantial share of electricity consumption and is a critical requirement for safe operation.

The study experimentally investigated an optical fiber solar daylighting system utilizing a single large-diameter polymer optical fiber and an electronic feedback control mechanism. Laboratory tests conducted on a solar collector test bench under controlled conditions ( $AM1.5$ ,  $1000 \text{ W/m}^2$ ) confirmed the technical capability of the system to provide a uniform and stable luminous flux. Statistical analysis using one-way ANOVA demonstrated a statistically significant influence of concentrator geometry on luminous efficiency, thereby justifying the need for optical optimization and the application of active electronic control.

An architecture of a combined energy-lighting unit integrated into an urban microgrid alongside other DER has been proposed. Such a system enables the reduction of electrical loads for lighting during daytime hours, enhances the autonomy and reliability of critical infrastructure facilities, and contributes to the development of resilient decentralized energy systems.

The obtained results are relevant not only for Ukraine in the context of wartime conditions and post-war reconstruction, but also for European Union countries in the context of energy security strategies, microgrid development, and the achievement of Net Zero climate targets.

## REFERENCES

1. ASTM G173-03(2020) (2020) Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
2. European Commission (2018) Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), European Commission, Brussels.
3. European Commission (2020) A Renovation Wave for Europe – Greening our Buildings, European Commission, Brussels.
4. EN 12975-2:2006 (2006) Thermal solar systems and components – Solar collectors – Test methods, European Committee for Standardization.
5. Green Deal Ukraine (2024) Decentralized Energy Solutions for Urban Resilience, Green Deal Ukraine, Kyiv.
6. Yakymchuk M., Alipatova M. (2024) Solar energy system, Patent of Ukraine No. 155842, IPC F03G6/06, H01L31/04, published 17.04.2024, Bulletin No. 16/2024.
7. International Energy Agency (IEA) (2023) Distributed Energy Resources: Powering a Secure Energy Transition, International Energy Agency, Paris.
8. International Energy Agency (IEA) (2024) Ukraine’s Energy Security and the Coming Winter, International Energy Agency, Paris.
9. ISO 9806:2017 (2017) Solar energy — Solar thermal collectors — Test methods, International Organization for Standardization, Geneva.
10. Kyiv School of Economics (2024) Energy Infrastructure Damage Assessment in Ukraine, Kyiv School of Economics, Kyiv.
11. Labor für konventionelle und erneuerbare Energien, Berliner Hochschule für Technik (2023) Solarenergie – Leistungsprüfstand für Solarkollektoren, labor.bht-berlin.de/kee/solarenergie
12. UNDP (2023) Towards a Green Transition of the Energy Sector in Ukraine, United Nations Development Programme, Kyiv.