

**В.М.Сорокін¹, Д.В.Пекур¹, В.І.Назаренко², С.В.Шпак³,
Ю.О.Басова⁴, Г.М.Кожушко⁵, Д.В.Кислиця⁵**

ІНТЕГРОВАНЕ ОСВІТЛЕННЯ ПРИМІЩЕНЬ: ШЛЯХ ЗНИЖЕННЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СВІТЛОДІОДНИМИ ОСВІТЛЮВАЛЬНИМИ СИСТЕМАМИ

Світло, крім забезпечення зорової функції, здійснює на людину біологічний вплив, який називають реакцією на світло, що не формує зображення зорового образу. Реакції на світлові стимули, що не формують зображення, забезпечують нормальний денний фізіологічний стан людини. В новому міжнародному стандарті ISO/CIE 8995-1:2025 «Light and lighting - Lighting of workplaces» встановлено вимоги до освітлення робочих місць у приміщеннях з рекомендаціями стосовно циркадної стимуляції організму людини в потрібний час доби. Відзначається, що для досягнення рекомендованих значень циркадної ефективності потрібні вищі рівні освітленості, ніж встановлені для зорових функцій стандартами на освітлення робочих місць, що негативно впливає на енергоефективність освітлення.

Метою даної роботи є аналіз шляхів зниження споживання електроенергії систем освітлення та експериментальні дослідження можливостей забезпечення необхідного рівня інтегрованого освітлення при енерговитратах, що не перевищують встановлені в ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення».

В роботі дана характеристика тестової кімнати, в якій проводились дослідження, методів дослідження, проведено аналіз шляхів зниження енергоспоживання систем освітлення за рахунок характеристик світлодіодних світильників, ефективного використання денного світла, підвищення відбиття світла внутрішніми поверхнями приміщень та ін.

Показано, що за рахунок використання денного світла, використання світлодіодних світильників зі світловою віддачею не нижче 100 лм/Вт і $CCT = 6000-6500\text{ K}$ та відбивання світла стелею та стінами з коефіцієнтом відбивання 0,8 можна забезпечувати рівень меланопічної освітленості відповідно до вимог стандарту ISO/CIE 8995-1:2025, не перевищуючи норми питомої потужності (Вт/м²) згідно з чинними рекомендаціями ДБН В.2.5-28:2018.

На основі отриманих результатів зроблено висновки та рекомендації.

Ключові слова: світлодіодні джерела світла, інтегроване освітлення, встановлена питома потужність на освітлення (Вт/м²), меланопічний еквівалент денного світла $mel\ EDI$, вертикальна освітленість E_v , денне світло, коефіцієнт відбиття світла поверхнею.

1. ВСТУП

Світло, крім забезпечення зорової функції, здійснює на людину незоровий біологічний та психологічний вплив, який називають реакцією на світло, що не формує зображення зорового образу (non-image-forming – NIF) або не візуальною (non-visual – NV) відповіддю [1]. Реакції на світлові стимули, не пов'язані з формуванням зорового образу, відіграють ключову роль у регуляції добових біоритмів і підтриманні фізіологічного гомеостазу людини впродовж дня. Незорові ефекти світла впливають на здоров'я, благополуччя, активність і сон людини. Освітлення, що поєднує як візуальний, так і невізуальний ефект та створює фізіологічні та психологічні переваги для людей, називають «інтегрованим» освітленням [2]. Світло є основним екзогенним сигналом для регулювання ендогенних циркадних ритмів організму, синхронізації їх із 24-годинним циклом «світло - темрява», що визначається обертанням Землі [3].

До недавнього часу стандарти на освітлення були зосереджені на візуальних аспектах, зоровому комфорту та енергоефективності і не розглядали невізуального впливу світла на людину [4]. Фотометричних та коліметричних параметрів, що використовуються в цих стандартах, недостатньо для опису і проєктування систем освітлення, що враховують невізуальні ефекти світла. В новому міжнародному стандарті ISO CIE 8995-1:2025 [5]

вперше встановлено вимоги до освітлення робочих місць в адміністративних приміщеннях з рекомендованими стосовно циркадної стимуляції за рахунок вибору спектра та інтенсивності освітлення в потрібний час доби. Освітлення може здійснюватись денним світлом, електричними джерелами світла або їх комбінацією. Параметром для визначення циркадних величин освітлення є меланопічний еквівалент денного світла (melanopic equivalent daylight illuminance) – mel EDI [6].

Люди, які працюють в закритих приміщеннях, тривалий час знаходяться в умовах електричного освітлення. При забезпеченні параметрів освітлення вимогами міжнародних стандартів, наприклад, ДСТУ EN 12464-1 [4], має місце відповідність його зоровим потребам, але це не обов'язково забезпечує належну інтенсивність та спектральний склад випромінювання, необхідних для стимуляції циркадної системи, що може призводити до порушень циркадних ритмів. Денне світло змінюється за інтенсивністю, спектральним розподілом потужності (spectral power distributions – SPD) і напрямком протягом днів і сезонів. Ці властивості денного світла роблять його ідеальним чинником для активізації циркадної системи, оскільки воно забезпечує природний спектр та інтенсивність в потрібний час протягом дня [7].

Слід зауважити, що інтенсивність природного світла приблизно в 10-50 разів перевищує стандартизовані норми освітленості для приміщень. Крім того, спектральний склад денного світла суттєво відрізняється від спектра більшості електричних джерел світла [8]. У зв'язку з цим, повноцінна імітація денного світла є неможливою через обмеження, передбачені чинними енергетичними нормативами [9,10]. Проте результати чисельних наукових досліджень свідчать, що світло, наближене до природного денного, позитивно впливає на сон, бадьорість, настрій і зоровий комфорт. Саме ці дані було покладено в основу нормування інтенсивного освітлення, передбаченого у стандарті ISO CIE 8995-1:2025 [5].

У порівнянні із зоровою системою людини циркадна система потребує більш високого рівня освітленості і є більш чутливою до синього світла. Для досягнень рекомендованих значень циркадної ефективності потрібні вищі рівні освітленості, ніж встановлені для зорових функцій чинними стандартами. В зв'язку з цим, при впровадженні інтегрованого освітлення стає актуальною проблема мінімізації споживання електроенергії.

Метою даної роботи є визначення шляхів зниження споживання електроенергії системами інтегрованого освітлення та експериментальна оцінка їхньої ефективності, зокрема, при використанні денного світла та світла світлодіодних джерел з різними характеристиками, впливу оптичних характеристик відбиваючих поверхонь приміщення та вікон на циркадну ефективність системи освітлення та ін.

2. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

2.1. Використання денного світла

До недавнього часу збільшення використання денного світла для освітлення приміщень було направлено на економію електроенергії. Дослідження останніх двох десятиріч показали, що денне світло має переваги перед світлом електричних джерел і для невізуальних ефектів. Встановлено, що люди, які використовують тільки денне світло, мають кращу якість сну, ніж ті, що використовують електричне освітлення. При обмеженому доступі до денного світла погіршується сон і має місце порушення циркадних ритмів. На відміну від електричного освітлення, денне світло характеризується значними змінами за інтенсивністю, спектральним розподілом потужності і напрямом. Це пов'язано, переважно, з часом доби і метеорологічними умовами. Зміна освітленості на відкритих майданчиках може змінюватись від значень, менших ніж 1000 лк, до максимальних – біля 150 000 лк влітку опівдні при безхмарному небі [11]. ISO CIE опублікували міжнародний стандарт ISO 15469:2004 [12], який визначає світлові характеристики денного світла, щоб можна було

використовувати цю інформацію при розрахунках освітленості в приміщеннях. Спектральна динаміка та просторові варіації якості денного світла в приміщеннях досліджувались в [13,14]. Пропонується при використанні денного світла враховувати спектральні і просторові варіації (на відміну від статичних параметрів, які використовуються для оцінки якості денного світла в будівлях). Будівельна практика та норми не враховують спектральний склад денного світла. Системи скління оцінюються на основі загального коефіцієнта пропускання світла, а не спектрального. Розглядаються й інші параметри денного світла, які доцільно враховувати при проектуванні освітлення. Зокрема, в [15, 16, 17] аналізуються такі параметри будівлі, як співвідношення площі вікон до підлоги, вікон до стін (WWR, %), оптичні властивості скління.

Щоб задовольнити циркадні вимоги при мінімізації споживання електроенергії, денне світло має вирішальне значення. Результати попередніх досліджень показали, що при задовільних умовах денного освітлення значного збільшення споживання електроенергії не буде.

2.2.Зниження споживання електроенергії за рахунок покращення відбиття поверхонь приміщень

Відбивна здатність поверхонь для досягнення необхідної циркадної стимуляції за даними [18] має велике значення. Покращення відбиття поверхонь приміщень є більш ефективним, ніж збільшення відношення площі вікон до стін (WWR, %). Дослідження впливу відбиваючих поверхонь на циркадні характеристики систем освітлення було проведено у низці наукових праць [19, 20, 21, 22]. Встановлено, що у порівнянні з білою відбиваючою поверхнею, використання жовтого, помаранчевого та червоного кольорів призводить до зниження меланопічної освітленості. Найбільш суттєве зменшення спостерігається при жовтому кольорі – на 12 %; помаранчевий і червоний знижують освітленість на 9 % і 6 % відповідно [22]. Спрямування світлового потоку на поверхню з високою відбиваючою здатністю покращує рівномірність розподілу світла і підвищує циркадний відгук. Відбите світло внутрішніми поверхнями приміщення змінює не тільки просторовий розподіл, але й спектральний склад випромінювання і може змінювати індуковані світлом циркадні реакції.

Слід зазначити, що більшість результатів у проаналізованих дослідженнях отримано шляхом моделювання, а не за допомогою експериментальних вимірювань. Лише незначна частина з них враховує енергетичні аспекти. Крім того, не у всіх роботах розглядалися спектральні характеристики відбиваючих поверхонь. Деякі згадані інформаційні прогалини планується заповнити в межах даного дослідження.

2.3.Вплив характеристик електричних джерел світла на рівень споживання електроенергії в системах інтегрованого освітлення

На біологічну силу світлового подразника впливають наступні фактори: рівень освітленості, спектральний склад світла, просторовий розподіл світла в тривимірному світловому полі, а також тривалість впливу та час доби [17-24]. Тому характеристики джерел світла з точки зору ефективності споживання електроенергії та корисності для інтегрованого освітлення, а також позитивного впливу на здоров'я людей можна узагальнити за допомогою наступних ключових елементів:

- висока світлова ефективність;
- широкий діапазон колірності світла (широкий діапазон CCT);
- можливість регулювати світловий потік;
- можливість змінювати розподіл світлового потоку в просторі;
- можливість регулювати спектр випромінювання;

- можливість застосування електричних систем керування освітленням.

Слід також відзначити, що для правильного зорового сприйняття та зорового комфорту електричні джерела світла мають забезпечувати високу якість кольоропередачі та не створювати таких негативних явищ, як відблиски, миготіння яскравості, фотобіологічну небезпеку для очей.

Найбільш перспективними джерелами для систем інтегрованого освітлення є світлодіодні лампи та світильники [11]. Вони відповідають практично всім перерахованим вимогам.

Сьогодні лампи та світильники з використанням світлодіодів стали основною технологією освітлення практично у всіх сферах. Вони мають цілий ряд переваг в порівнянні з лампами розжарювання та розрядними лампами. Крім енергоефективності, необхідно назвати високу надійність та тривалий строк служби, екологічність, стійкість до механічних впливів, електро-, пожежо- та вибухобезпечність. Завдяки компактності світлодіодів створюються нові можливості застосування ефективної оптики, різних дизайнерських рішень, а також додаткові зручності при експлуатації за рахунок систем керування освітленням, застосовуванням цифрових контролерів та ін. [11].

Питанням економії електричної енергії при використанні електронних систем керування освітленням присвячена велика кількість наукових праць. Одним з найбільш ефективним напрямком є використання в сучасних освітлювальних системах цифрових технологій [11,23]. Разом зі світлодіодними технологіями освітлення цифровізація і мережа Інтернет створюють фактично нову реальність світлотехніки.

Витрати електроенергії на освітлення можуть бути знижені шляхом оптимальної роботи систем освітлення в кожен момент часу. Найбільш ефективно це можливо здійснювати за допомогою автоматизованих систем керування освітленням. Автоматизовані системи керування виконують наступні типові функції [24]:

- Підтримання штучної освітленості в приміщенні на заданому рівні. Досягається це введенням в системи освітлення фотодатчика, що контролює утворювану освітленість. Ця функція дозволяє економити електроенергію за рахунок обмеження «надлишкової освітленості».

- Врахування природної освітленості в приміщенні. Як правило, потужність систем освітлення розраховується без врахування частки природного світла, що потрапляє в приміщення в світлу частину доби. Якщо підтримувати освітленість, що створюється спільно електричним джерелом системи освітлення та природним світлом на заданому рівні, то можна знижувати потужність системи освітлення в кожний момент часу (в певний період року, часу доби). Ця функція може здійснюватися датчиком рівня освітленості, який відслідковує повну (природну і штучну) освітленість. При цьому можна економити до 20-30 % електроенергії.

- Врахування часу доби і днів тижня. Додаткова економія електричної енергії може бути досягнена вимиканням систем освітлення в певний час доби та у вихідні і святкові дні. Для реалізації цієї функції система освітлення має бути обладнана власним графіком реального часу вмикання/вимикання систем освітлення.

- Врахування присутності людей в приміщенні. При застосуванні в системі освітлення датчика присутності можна вмикати і вимикати систему освітлення залежно від того, чи є люди в приміщенні. За рахунок такої автоматизації можна економити електричну енергію споживання до 10-25%.

Зростання ролі світлодіодів в технологіях освітлення спричинило новий поштовх і в розвитку систем світлорегулювання. Важливою перевагою світлодіодних світильників перед світильниками з розрядними лампами є можливість більш ефективно здійснювати керування світловим потоком. В світлодіодному світильнику можна реалізувати плавну зміну

світлового потоку (димінг) в ручному і автоматичному режимах. Плавне регулювання світлового потоку дозволяє більш ефективно використовувати зовнішню освітленість і знизити витрати електричної енергії.

Всі призначені для економії електроенергії системи керування освітленням в своїй основі базуються на використанні датчиків часу, присутності людей, рівня освітленості або комбінованих датчиків, що об'єднують в собі ці функції.

Сучасні інтелектуальні датчики є головними засобами керування системами освітлення. Ці датчики можуть бути адаптовані стосовно вимог до конкретної ситуації, зміни природного освітлення та ін.

Для підвищення комфортності освітлення плавне регулювання датчика залежно від рівня природної освітленості є важливим параметром. Датчики, що приєднані до окремого світильника або групи світильників, протягом дня здійснюють плавне регулювання рівня освітленості за заданою програмою.

Новим перспективним напрямком економії електричної енергії є індивідуальне керування освітленням. Використання спеціального програмного забезпечення дозволяє індивідуальним користувачам за допомогою робочих станцій і офісних комп'ютерів керувати освітленням. Економія електроенергії при цьому досягається шляхом мінімізації рівня загального освітлення і максимально ефективного використання місцевого освітлення.

Найбільш перспективними системами регулювання освітлення є системи, в яких регулюються не тільки рівень освітленості, а і зміна кольору світла. Світлодіоди є ідеальними джерелами світла, що забезпечують точну установку необхідної колірності.

В даній роботі наведено результати дослідження питомих втрат електричної енергії для досягнення необхідного рівня меланопічної освітленості при використанні світлодіодних джерел світла та при змішаному освітленні (денне світло та світло світлодіодних джерел).

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Дослідження світлових, колориметричних та циркадних характеристик системи освітлення проводилися в тестовій кімнаті, характеристика якої подається нижче. Кімната розміщена на першому поверсі будівлі ДП «Полтавастандартметрологія». Розміри кімнати: довжина – 2,4 м, ширина – 2,2 м, висота стелі – 2,6 м. Розмір вікна – 2 м × 1,8 м, площа заклоєної частини $\approx 2,6 \text{ м}^2$. Використовуючи екрани, розмір вікна можна зменшувати в два рази або закрити кімнату від зовнішнього освітлення повністю.

Стеля, стіни і екрани мають білий колір з коефіцієнтом відбиття світла $\rho \approx 82 \%$, підлога має світло-сірий колір з коефіцієнтом відбиття $\rho \approx 38 \%$. В центрі кімнати на стелі закріплений світлодіодний світильник потужністю 39,3 Вт зі світловим потоком 3968 лм з корельованою колірною температурою 4000 К і загальним індексом кольоропередачі $R_a = 81$. Розміри світильника 0,6 м × 0,6 м. Передбачена заміна світильника на світильники з іншими ССТ. Для збільшення рівнів горизонтальної (E_H) і вертикальної (E_V) освітленості використовуються додаткові нестационарні світлодіодні світильники з різною колірною температурою для підсвічування стелі та стін. Для зміни спектральних характеристик та коефіцієнтів відбиття світла від поверхонь тестової кімнати передбачено закріплення на стінах шпалер з різними спектральними та відбиваючими показниками. Коефіцієнт відбиття і його спектр можна змінювати і для підлоги. Загальний вигляд тестової кімнати зображено на рис.1, план кімнати і місця, в яких проводяться вимірювання, – на рис.2.

Вимірювання горизонтальної освітленості E_H , спектральної густини світла після багаторазового відбиття від стелі, стін та підлоги, а також яскравість освітлюваної поверхні здійснюється на рівні 0,8 м від підлоги; вимірювання вертикальної освітленості та яскравості стелі та стін – на рівні 1,2 м від підлоги.

Перелік параметрів, що вимірювались при дослідженнях з використанням природного світла, світла світлодіодних джерел та змішаного світла, а також інформація про методики вимірювання та прилади і обладнання, що застосовуватимуться при цьому, наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Перелік вимірюваних світлових, колірних та меланопічних параметрів, методів вимірювання та випробувального обладнання (приладів), що використовуються при дослідженнях.

Параметри, що вимірювалися	Одиниці вимірювання	Нормативний документ на метод вимірювання	Випробувальне обладнання та прилади
Світловий потік та його просторовий розподіл	лм	ДСТУЕН13032-2:2016 ДСТУЕН13032-4:2019	Гоніофотометр GO-2000B з комплектом еталонних джерел світла та вимірювальними приладами
Просторовий розподіл сили світла	кд	ДСТУЕН12464-2:2016 ДСТУЕН13032-4:2019	
Спектральна енергетична освітленість, E	мВт/м ² ·нм	ДСТУЕН13032-1:2016 ДСТУЕН13032-4:2019	Спектрометр UPRTEK MK350S
Освітленість горизонтальна, E_H , вертикальна, E_V	лк	ДСТУЕН12464-1:2016	
Корельована колірна температура	К	ДСТУЕН13032-4:2019	
Загальний індекс кольоропередачі, R_a	відн.од	ДСТУ СІЕ 013.3:2017	
Параметри миготіння та стробоскопічного ефекту P_{StLM} , SVM	відн.од	Регламент Комісії (ЄС) № 2019/2020	Спектрометр UPRTEK MK350S
Яскравість, L	кд/м ²	ДСТУЕН13032-4:2019	Спектральний колориметр випромінювання СРК-200С
Спектральна енергетична яскравість, $L_{e\lambda}$	мВт/м ² ·ср·нм		
Спектральний коефіцієнт відбиття, ρ_λ	відн.од/нм		Спектрометр UPRTEK MK350S Спектральний колориметр випромінювання СРК-200С Фотометр кульовий фотоелектричний ФМШ-56М
Інтегральний коефіцієнт відбиття світла (стелі, стін, підлоги, робочої поверхні), ρ	відн.од/нм		Спектрометр UPRTEK MK350S Спектральний колориметр випромінювання СРК-200С Фотометр кульовий фотоелектричний ФМШ-56М
Циркадна освітленість, CLA	меланопічний лк		Спектрометр UPRTEK MK350S
Меланопічний еквівалент денного світла, mel EDI	mel EDI лк	CIE S 026/E:2018	Спектрометр UPRTEK MK350S
Показник циркадного стимулу, CS	відн. од.		Спектрометр UPRTEK MK350S

Форма представлення даних вимірювання фотометричних та колориметричних параметрів освітлення приміщення наступна:

- дата та час вимірювання;
- інформація про погодні умови: сонячно, хмарно;
- досліджувані параметри:
 - 1) горизонтальна (E_H) і вертикальна (E_V) освітленості при наступних умовах:
 - при природному освітленні (через вікно різного розміру);
 - при освітленні денним та світлом світлодіодних світильників;
 - при електричному освітленні світлодіодними світильниками:
 - а) при закритому екраном вікні;
 - б) при відсутності екрана;
 - освітленість в площині вікна (ззовні і з кімнати);
 - 2) спектр випромінювання та CCT джерел світла;
 - 3) спектр і CCT світла після багаторазових відбиттів від стелі та стін;
 - 4) показники мерехтіння яскравості (освітленості), P_{StLM} та SVM;
 - 5) загальний та спеціальні індекси кольоропередачі, R_a , R_i ;
 - 6) яскравість поверхонь стін та стелі, kd/m^2 .



а)



б)

Рис.1. Загальний вигляд тестової кімнати:
а) із закритим вікном; б) з вікном розміром 2 м × 1,8 м.

Вертикальна освітленість вимірювалась в напрямках, вказаних стрілками для кожного місця вимірювання (див. план тестової кімнати); P_{StLM} та SVM – тільки в центрі кімнати.

Циркадна освітленість (CLA), меланопічний еквівалент денного світла (mel EDI) і показник циркадного стимулу (CS) визначались з використанням рекомендацій, наведених в роботах [6,7,23,25].

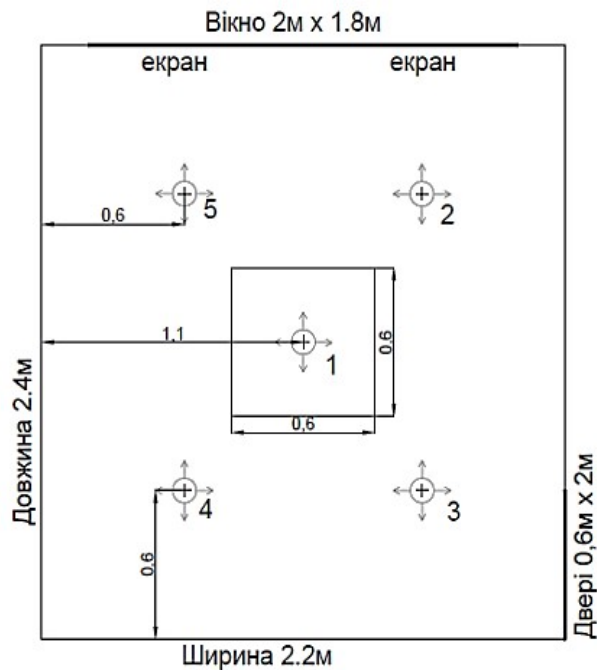


Рис.2.План тестової кімнати:

«+» – місця вимірювання горизонтальної освітленості, E_H ;



« » – місця вимірювання вертикальної освітленості, E_V .

Стрілками показано напрямки вимірювання вертикальної освітленості. Цифрами позначені номери місць вимірювання.

В даній роботі в якості електричного джерела світла використовували стельові світлодіодні світильники потужністю 39,3 Вт ($\Phi = 3968$ лм, CCT 4000 К, $\eta = 101$ лм/Вт, $R_a = 81,1$) та потужністю 35 Вт ($\Phi = 3560$ лм, CCT 6500 К, $\eta = 101,7$ лм/Вт, $R_a = 80,6$).

Вимірювання горизонтальної освітленості E_H та вертикальної E_V проводили при освітленні природним світлом (без додаткового електричного освітлення), світлодіодними світильниками (при закритому вікні) та при змішаному освітленні (природне денне світло та світло від світлодіодного світильника). При використанні денного світла, з метою оцінки величини світлового потоку, що надходить через вікно, додатково вимірювали вертикальну освітленість в площині вікна.

Для оцінки ефективності використання електричної енергії та світлового потоку для створення необхідного рівня вертикальної освітленості E_V розраховувались питомі показники P/A (Вт/м²), E_V/Φ (лк/лм) та E_V/P (лк/Вт). На основі вимірних значень E_V розраховували меланопічний еквівалент денного світла mel EDI лк. Обчислюється mel EDI множенням фотопічної освітленості E на меланопічний коефіцієнт ефективності денного світла (mel DER), який змінюється в залежності від спектра випромінювання від 0,4 до 1,6 од. [6]:

$$\text{mel EDI} = E_V \cdot \text{mel DER}. \quad (1)$$

Меланопічний еквівалент денного світла mel EDI, який базується на стандартному світлі D65, показує освітленість денним світлом, що забезпечує такий самий ефект меланопічного освітлення, що і джерело, яке тестується. Він є метрикою для визначення циркадних величин освітлення, встановлений в міжнародному стандарті ISO/CIE 8995-1:2025 [5].

Результати вимірювань і розрахунків наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Результати вимірювань фотометричних та колориметричних параметрів та розрахунку меланопічного еквівалента денного світла $mel\ EDI$ і показників енергоефективності.

	$E_{Hсер},$ лк	$E_{Vсер},$ лк	$\frac{E_{Vсер}}{E_{Hсер}},$ відн.од.	$CCT_{сер.}$ відб.світла, К	$R_a_{сер.}$ відб.світла відн.од.	$mel\ EDI,$ лк	$P/A,$ Вт/м ²	$\frac{E_v}{\Phi_{світильника}}$ лк/лм	$\frac{E_v}{P}$ лк/Вт
1	Освітлення світлодіодним світильником потужністю 39,3 Вт, $\Phi = 3968$ лм, $CCT = 4000$ К, $R_a = 81,1$ (при закритому вікні)								
	710	412	0,58	3919	81,4	285	7,5	0,1	10,5
2	Освітлення світлодіодним світильником потужністю 35 Вт, $\Phi = 3560$ лм, $CCT = 6500$ К, $R_a = 80,6$ (при закритому вікні)								
	609	316	0,52	6305	80,7	290	6,6	0,09	9,03
3	Освітлення денним світлом (13.12.2024, 14 год, хмарно, площа вікна -2,6 м ² , освітленість в площині вікна -433 лк)								
	136	124	0,91	5835	98,8	113	---	---	---
4	Освітлення денним світлом (13.12.2024, 15 год, хмарно, площа вікна - 1,3 м ² , освітленість в площині вікна - 413 лк)								
	59	42	0,71	5308	98,5	37	---	---	---
5	Освітлення денним світлом (18.04.2025, 12 год, ясно, площа вікна - 1,3 м ² , освітленість в площині вікна -3183 лк, $CCT = 5405$ К, $R_a = 94,2$)								
	308	225	0,73	4846	90,6	185	---	---	---
6	Освітлення денним світлом (18.04.2025, 13 год, ясно, площа вікна -2,6 м ² , освітленість в площині вікна - 3190 лк, $CCT = 5410$ К, $R_a = 94,2$)								
	592	404	0,68	4995	91,0	330	---	---	---
7	Освітлення денним світлом та світлом світлодіодного світильника потужністю 35 Вт, $\Phi = 3560$ лм, $CCT = 6500$ К, $R_a = 80,6$ (13.12.2024, 12 год, хмарно, площа вікна -2,6 м ² , освітленість в площині вікна - 442 лк)								
	691	325	0,47	6018	81,2	300	6,6	0,091	9,3
8	Освітлення денним світлом та світлом світлодіодного світильника потужністю 39,3 Вт, $\Phi = 3968$ лм, $CCT = 4000$ К, $R_a = 81,1$ (13.12.2024, 13 год, хмарно, площа вікна - 2,6 м ² , освітленість в площині вікна - 448 лк)								
	894	472	0,46	4574	89,3	370	7,5	0,1	10,5
9	Освітлення денним світлом (30.05.2025, 15 год, ясно, площа вікна -2,6 м ² , освітленість в площині вікна- 1806 лк, $CCT = 4860$ К, $R_a = 99,2$)								
	396	253	0,64	4998	85,7	207	---	---	---
10	Освітлення денним світлом та світлом світлодіодного світильника потужністю 39,3 Вт, $\Phi = 3968$ лм, $CCT = 4000$ К, $R_a = 81,1$ (30.05.2025, 15 год, ясно, площа вікна - 2,6 м ² , освітленість в площині вікна -1806 лк)								
	1020	564	0,55	4590	81,6	460	7,5	0,1	10,5

В таблиці 3 наведені максимально допустимі потужності (Вт/м²) для забезпечення освітленості на робочій поверхні для різних значень індексів приміщень, що регламентується в [10]. Індекс приміщення «i» визначається як:

$$i = \frac{a \cdot b}{h(a + b)}, \quad (2)$$

де a , b , h – довжина, ширина та висота приміщення відповідно.

Тестова кімната має індекс – 0,6.

Таблиця 3. Максимально допустимі питомі встановлені потужності на освітлення робочих місць в приміщеннях [10].

Освітленість на робочих поверхнях, лк	Індекс приміщення	Максимально допустима питома встановлена потужність, Вт/м ²
750	0,6	37
	0,8	30
	1,25	28
	2,0	25
	3 та більше	23
500	0,6	15
	0,8	14
	1,25	13
	2,0	11
	3 та більше	10
400	0,6	15
	0,8	14
	1,25	13
	2,0	11
	3 та більше	10

Аналізуючи отримані результати, можна відзначити наступне:

– За рахунок денного світла (без використання електричного освітлення) було досягнуто необхідного рівня $mel\ EDI = 250$ лк при площі вікна $2,6\ m^2$ тільки при прямому освітленні вікна променями Сонця з рівнем освітленості в площині вікна, більшою за 3000 лк. При освітленні вікна розсіяним світлом і хмарному небі рівень вертикальної освітленості в тестовій кімнаті, як правило, був меншим за 250 лк. Тому навіть весною, влітку і ранньою осінню для досягнення нормативного рівня меланопічного освітлення в багатьох випадках потрібно буде додатково застосовувати електричне освітлення.

– Використовуючи світлодіодні світильники зі світловою віддачею більше $100\ \text{лм/Вт}$ і CCT від $4000\ K$ до $6000\ K$ при коефіцієнті відбивання поверхонь не менше $0,8$, необхідний рівень меланопічної освітленості $mel\ EDI$ більше рівня 250 лк досягається навіть без використання денного світла при питомій потужності системи освітлення, що не перевищує встановлену в [10] для освітлення робочих місць.

– Використання денного світла може збільшувати рівень меланопічної освітленості, що створюється згаданими світлодіодними світильниками в залежності від рівня освітленості в площині вікна до $50\ \%$.

Роль світлодіодних джерел світла є вирішальною для зниження споживання електроенергії системами інтегрального освітлення [26].

З отриманих результатів дослідження можна також зробити наступні рекомендації стосовно підвищення рівня вертикальної освітленості, не збільшуючи електричну потужність системи освітлення:

1. При зниженні освітленості, що створює денне світло в площині вікна нижче рівня вертикальної освітленості E_v , який створює електричне джерело в приміщенні, площу вікна доцільно екранувати з використанням жалюзів або іншим шляхом. Екранування вікна жалюзіями (з високим коефіцієнтом відбиття світла) знижує втрату світлового потоку електричного джерела світла в темний час доби і зменшує рівень світлового забруднення навколишнього середовища, що створюється при освітленні приміщень.

Вертикальна освітленість E_v в освітленому приміщенні в темний час доби при екранованому вікні (в порівнянні з неекранованим) може збільшуватись в залежності від розміру вікна до 20 %.

2. Недоцільно використовувати стельові світильники з глибокими типами КСС, так як такі світильники більшу частину світлового потоку спрямовують на створення горизонтальної освітленості в приміщенні і недостатньо освітлюють стіни. Враховуючи, що коефіцієнти відбиття світла від підлоги і інших об'єктів, які знаходяться в приміщенні (столи, стільці тощо), менші від коефіцієнтів відбиття для стін і стелі, мають місце значні втрати світлового потоку за рахунок поглинання світла. Зменшити ці втрати можна шляхом підвищення коефіцієнтів відбиття світла підлогою, столами та іншими об'єктами, що знаходяться в приміщенні.

3. Поліпшення відбиття світла внутрішніми поверхнями приміщень є простим і дешевим способом збільшення рівня непрямого освітлення рогівки ока. Матові поверхні збільшують відношення меланопічної освітленості до фотопічної в порівнянні з глянцевиими. Поверхні білого кольору забезпечують більш ефективну біологічну стимуляцію в порівнянні з кольоровими, особливо з жовтими, помаранчевими, червоними, а відбиваючі поверхні темних кольорів завжди негативно впливають на циркадну ефективність приміщень.

4. Для отримання високих рівнів циркадної ефективності в ранковий і денний час, особливо в першій половині дня, потрібно використовувати електричні джерела світла з високим ССТ (6000-7000 К). І навпаки, в другій половині дня, у вечірній і нічний час (перед сном) використовувати світло з більш низькими ССТ (4000 К і нижчими).

4.ВИСНОВКИ

1.Традиційні стандарти освітлення робочих місць, орієнтовані винятково на зорові потреби людини, не забезпечують належної стимуляції її циркадної системи, а реалізація інтегрованого освітлення, що враховує як візуальні, так і невізуальні впливи світла, потребує використання освітлювальних систем з регульованими спектральними характеристиками. В міжнародному стандарті ISO/CIE 8995-1:2025 «Light and lighting – Lighting of workplaces» вперше встановлено вимоги до освітлення робочих місць у приміщеннях з рекомендаціями стосовно циркадної синхронізації та стимуляції циркадної системи людини у відповідності з її природним ритмом.

2.Для досягнення рекомендованих значень циркадної ефективності потрібні вищі рівні освітленості, ніж встановлені для зорових функцій стандартом на освітлення робочих місць в приміщеннях, що негативно впливає на енергоефективність освітлення.

3.Крім збільшення рівня освітленості шляхом збільшення електричної потужності системи інтегрованого освітлення, існує ряд інших шляхів: ефективне використання денного світла; використання джерел світла з більш високою світловою віддачею і високою циркадною ефективністю світла; використання світильників з просторовим розподілом, що підвищує рівень вертикальної освітленості E_v (використовувати світильники з косинусними та широкими типами КСС замість глибоких КСС); підвищувати відбиття світла внутрішніми поверхнями приміщення; підтримувати освітленості в приміщенні на зоровому рівні за рахунок використання автоматичного керування освітленням і обмеженням «надлишкового» освітлення.

4. Показано, що за рахунок використання денного світла, використання світлодіодних світильників зі світловою віддачею не меншою ніж 100 лм/Вт та CCT від 4000 К до 6500 К, коефіцієнтів відбиття світла стелею та стінами ρ не менше ніж 0,8, можна забезпечити рівень меланопічної освітленості приміщення у відповідності з вимогами ISO/CIE 8995-1:2025 «Light and lighting – Lighting of workplaces» без перевищення встановленої питомої потужності системи освітлення, рекомендованої в ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» для освітлення робочих місць.

**V.M. Sorokin¹, D.V. Pekur¹, V.I. Nazarenko², S.V. Shpak³, Yu.O. Basova⁴,
H.M. Kozhushko⁵, D.V. Kyslytsia⁵**

INTEGRATED ROOM LIGHTING: A PATH TO REDUCING ENERGY CONSUMPTION IN LED LIGHTING SYSTEMS

In addition to ensuring visual functions, light exerts a biological effect on humans, known as non-image-forming (NIF) response to light. Such NIF responses to light stimuli support the normal physiological state of humans during daytime. The new international standard ISO/CIE 8995-1:2025 «Light and lighting - Lighting of workplaces» specifies requirements for workplace lighting in rooms, including recommendations for circadian stimulation at appropriate times of day. It notes that achieving the recommended values for circadian effectiveness requires higher illumination levels than those established by existing standards for visual functions, negatively impacting lighting energy efficiency. This study aims to analyze ways of reducing energy consumption of lighting systems and experimentally investigate methods for ensuring the required level of integrated lighting without exceeding energy consumption limits specified in DBN V.2.5-28:2018 «Natural and Artificial Lighting». The work provides a description of the test room used for experiments, outlines research methods, and analyzes various approaches for reducing energy consumption, including optimization of LED luminaires characteristics, effective use of daylight, and enhancing reflectivity of interior surfaces. It is demonstrated that using daylight, employing LED luminaires with luminous efficacy no lower than 100 lm/W and correlated color temperature (CCT) of 6000-6500 K, along with ceiling and wall surfaces having a reflectance coefficient of 0.8, can ensure melanopic illumination levels compliant with ISO/CIE 8995-1:2025 requirements, without exceeding specific installed power norms (W/m²) as stipulated by the DBN V.2.5-28:2018 guidelines. Conclusions and recommendations are formulated based on the obtained results.

Keywords: LED light sources, integrated lighting, installed lighting power density (W/m²), melanopic equivalent daylight illuminance (mel EDI), vertical illuminance (E_v), daylight, surface reflectance coefficient.

1. ISO CIE TR 21783:2022. Light and lighting — Integrative lighting — Non-visual effects. <https://www.iso.org/ru/standard/71623.html>.

2. CIE S 017/E:2020 ILV: *International Lighting Vocabulary, 2nd Edition*. DOI 10.25039/S017.2020.

3. Charles Jarboe, J Snyder, Mariana Figueiro. The effectiveness of light-emitting diode lighting for providing circadian stimulus in office spaces while minimizing energy use. *Lighting Research and Technology*. April 2019. **52**, №2:147715351983460. DOI:10.1177/1477153519834604.

4. ДСТУ EN 12464-1:2016. Світло та освітлення. Освітлення робочих місць. Частина 1. Внутрішні робочі місця (EN 12464-1:2011, IDT).

5. ISO CIE 8995-1:2025. Light and lighting — Lighting of work places. Part 1: Indoor. <https://www.iso.org/ru/standard/76342.html>.

6. CIE S 026/E: 2018 CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light <https://cie.co.at/publications/cie-system-metrology-optical-radiation-iprgc-influenced-responses-light-0>.

7. Kevin W. Houser, Tony Esposito. Human-Centric Lighting: Foundational Considerations and a Five-Step Design Process. *Front Neurol*. Jan. 2021. 27:12:630553. doi: 10.3389/fneur.2021.630553.

8. Baraa J. Alkhatatbeh, Somayeh Asadi. Role of Architectural Design in Creating Circadian-Effective Interior Settings. *Energies*. 2021. **14**, №20. 6731. <https://doi.org/10.3390/en14206731>

9. ДСТУ EN 15193-1:2017. Енергоефективність будівель. Енергетичні вимоги до освітлення. Частина 1. Технічні характеристики, Модуль М9 (EN 15193-1:2017, IDT).

10. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення: Державні будівельні норми України. Київ: Мінрегіон України. 2018. 90 с.

11. Maurizio Rossi. Circadian Lighting Design in the LED Era. January 2019. 277. ISBN: 978-3-030-11086-4. DOI:10.1007/978-3-030-11087-1.

12. ISO 15469:2004 (E)/CIE S 011/E2023. *Spatial distribution of daylight — CIE standard general sky*. <https://www.iso.org/ru/standard/38608.html>.
13. Tobias Kristiansen, Thomas K. Thiis, Ingunn Burud, Arnkell Jonas Petersen. Spectral Dynamics and Spatial Variations in Indoor Daylight Quality: A Case Study. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024. P.298-303. DOI:10.1007/978-981-97-8317-5_44.
14. Tobias Kristiansen, Thomas Thiis, Ingunn Burud, Arnkell Jonas Petersen. Measurements of spectral daylight variation in spaces: A case study. *E3S Web of Conferences*. August 2024. 562. DOI:10.1051/e3sconf/202456201002.
15. A. Sepúlveda, S.S.S. Salehi, F. De Luca, M. Thalfeldt. Solar radiation-based method for early design stages to balance daylight and thermal comfort in office buildings. *Front. Architect. Research*. 2023. №12. P.1030-1046.
16. D. D'Agostino, F. Minelli, F. Minichiello. New genetic algorithm-based workflow for multi-objective optimization of Net Zero Energy Buildings integrating robustness assessment. *Energy Build.* 2023.284. Article 112841.
17. Y. Zeng, H. Sun, B. Lin. Optimized lighting energy consumption for non-visual effects: a case study in office spaces based on field test and simulation. *Build. Environ.* 2021. 205. Article 108238.
18. Q. Yao, W. Cai, M. Li, Z. Hu, P. Xue, Q. Dai. Efficient circadian daylighting: a proposed equation, experimental validation, and the consequent importance of room surface reflectance. *Energy Build.* 2020. 210.
19. Laura Bellia, Urszula Błaszczak, Francesca Diglio, Francesca Fragliasso. Light-environment interactions and integrative lighting design: Connecting visual, non-visual and energy requirements in a case study experiment. *Building and Environment*. April 2024. **253**, №1. 111323/ <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111323>.
20. Q. Dai, Y. Huang, L. Hao, Y. Lin, K. Chen. Spatial and spectral illumination design for energy-efficient circadian lighting. *Build. Environment*. 2018.**146**.P. 216-225.
21. P. Hartman, L. Maňková, P. Hanuliak, M. Krajčík. The influence of internal coloured surfaces on the circadian efficiency of indoor daylight. *Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ.* 2017.P.493-500.
22. J. Hraška, P. Hartman. Daylighting: prediction of circadian effects of different spectral filters. *Advanced Materials Research, Trans Tech Publ.* 2014. P.386-389.
23. Yeh, L., et al. Autonomous light control by wireless sensor and actuator networks. *IEEE Sensors Journal*. 2010.**10**, №6. P.1029-1041. <https://doi.org/10.1109/jsen.2010.2042442>.
24. Кислиця Д.В., Басова Ю.О., Кислиця С.Г., Кожушко Г.М., Захарченко Р.В. Системи автоматичного керування освітленням – ефективний шлях економії електроенергії та підвищення якості освітлення. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2024. **4**, №78.
25. Lucas RJ, et al. Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends in Neurosciences*. January 2014. **37**, Issue 1. P.1-9. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2013.10.004>.
26. Kozhushko H.M., Sakhno T.V., Nazarenko V.I. Non-visual effects of light and their significance in led lighting systems designing: a critical review of the integrated lighting problem. *Ukrainian Journal of Occupational Health*. 2024.**20**, №3.P.214-227. DOI:10.33573/ujoh2024.03.214.

¹Інститут фізики напівпровідників
ім. В.С. Лашкарьова НАН України,
41,просп. Науки
03028 Київ,Україна

Отримано:

² Інститут медицини праці ім. Ю.І. Кундієва
Національної академії медичних наук України,
75,вул.Саксаганського
01033 Київ,Україна

³ДП «Полтавський регіональний науково-технічний центр
стандартизації, метрології та сертифікації», Полтава,Україна

⁴Державний аграрний університет,
1/3,вул. Сковороди,36003 Полтава,Україна

⁵Національний університет «Полтавська політехніка
імені Юрія Кондратюка»,
24,просп. Першотравневий,
36011 Полтава,Україна