

DOI: 10.15627/jd.2020.8

Економічна та енергетична ефективність систем керування штучним освітленням сходів багатоповерхових житлових будинків

В. Бурмака^{*а}, М. Тарасенко^а, К. Козак^а, В. Хомишин^а, Н. Сабат^б

^а Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, кафедра електричної інженерії, Тернопіль, Україна

^б Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна, кафедра комп'ютерних систем і мереж, Івано-Франківськ, Україна

Анотація

Метою даного дослідження є визначення економічної та енергетичної ефективності використання систем керування штучним освітленням за допомогою астрономічного реле та датчиків руху з різними типами джерел світла для сходів (майданчиків та маршів) багатоповерхових житлових будинків. Для цього було проведено аналіз помісячної інтенсивності руху мешканців 9-ти поверхових житлових будинків через дверні прорізи вхідних і квартирних дверей будинку. Визначено економічну та енергетичну ефективність використання систем керування штучним освітленням за допомогою астрономічного реле та датчиків руху з різними типами джерел світла. Встановлено, що незалежно від енергоефективності джерел світла використання астрономічного реле призводить до зниження споживання електроенергії на штучне освітлення на 49,31 – 50,58%. В той час, як використання датчиків руху призводить до більш суттєвого зменшення споживання електроенергії, а саме: при використанні ламп розжарення – на 97,92%, галогенних ламп – на 97,73%, компактних люмінесцентних ламп – на 95,27%, світлодіодних ламп – на 93,98%. Уперше отримані дані інтенсивності руху мешканців 9-ти поверхових житлових будинків через дверний проріз першого поверху для м. Тернопіль. Доведено економічну доцільність та енергоефективність використання суміщеного освітлення (природного і штучного) з системою керування штучним освітленням для сходів (маршів і майданчиків) багатоповерхових житлових будинків

Ключові слова: датчики руху, суміщене освітлення, природне освітлення, сходи, марші, майданчики, інтенсивність руху мешканців, система керування штучним освітленням.

$P_{ш.дс}$ – потужність системи штучного освітлення, кВт;

$P_{дс}$ – потужність ДС, кВт;

$N_{п}$ – кількість поверхів в будинку, шт.

$P_{ш.лр}$ – потужність системи штучного освітлення з ЛР в якості ДС, кВт;

$P_{ш.клл}$ – потужність системи штучного освітлення з КЛЛ в якості ДС, кВт;

$P_{ш.сдл}$ – потужність системи штучного освітлення з СДЛ в якості ДС, кВт;

$W_{ш}$ – сумарне річне споживання ЕЕ системою штучного освітлення, кВт·год;

T_r – річна тривалість світіння ДС на сходових клітках будинків, год/рік;

$W_{ш.лр}$ – сумарне річне споживання ЕЕ системою штучного освітлення з ЛР в якості ДС, кВт·год;

$W_{ш.клл}$ – сумарне річне споживання ЕЕ системою штучного освітлення з КЛЛ в якості ДС, кВт·год;

$W_{ш.сдл}$ – сумарне річне споживання ЕЕ системою штучного освітлення з СДЛ в якості ДС, кВт·год;

$C_{ш}$ – вартість володіння системою штучного освітлення, грн;

$C_{п}$ – початкова вартість необхідних ДС та пристроїв керування для системи штучного освітлення сходових кліток, грн;

$C_{ДС}$ – вартість одного ДС, грн;
 C_3 – вартість заміни одного ДС, грн;
 $N_{П.ДС}$ – кількість ДС, які вийшли з ладу за рік, шт/рік;
 $C_{ЕЕ}$ – вартість ЕЕ, грн/(кВт·год);
 T_E – терміну її експлуатації системи штучного освітлення, років;
 $W_{Ш}$ – ЕЕ, спожита астрономічним реле за рік, (кВт·год)/рік;
 $W_{Ш.АР}$ – сумарне річне споживання ЕЕ системою штучного освітлення з астрономічним реле, (кВт·год)/рік;
 $T_{ДС}$ – тривалість роботи ДС, год/рік;
 $W_{Ш.АР.ЛР}$ – сумарне річне споживання ЕЕ системою штучного освітлення з астрономічним реле, з ЛР в якості ДС, (кВт·год)/рік;
 $W_{Ш.АР.КЛЛ}$ – сумарне річне споживання ЕЕ системою штучного освітлення з астрономічним реле, з КЛЛ в якості ДС, (кВт·год)/рік;
 $W_{Ш.АР.СДЛ}$ – сумарне річне споживання ЕЕ системою штучного освітлення з астрономічним реле, з СДЛ в якості ДС, (кВт·год)/рік;
 K_3 – коефіцієнт запасу, відн. од.;
 $W_{ДР}$ – електроенергія спожита датчиками руху, (кВт·год)/рік;
 $W_{Ш.ДР}$ – сумарне річне споживання ЕЕ системою штучного освітлення з датчиками руху, (кВт·год)/рік;
 $I_{р.м}$ – інтенсивність руху мешканців будинку, раз/рік;
 $W_{Ш.ДР.ЛР}$ – сумарне річне споживання ЕЕ системою штучного освітлення з датчиками руху, з ЛР в якості ДС, (кВт·год)/рік;
 $W_{Ш.ДР.КЛЛ}$ – сумарне річне споживання ЕЕ системою штучного освітлення з датчиками руху, з КЛЛ в якості ДС, (кВт·год)/рік;
 $W_{Ш.ДР.СДЛ}$ – сумарне річне споживання ЕЕ системою штучного освітлення з датчиками руху, з СДЛ в якості ДС, (кВт·год)/рік;
 $P_{ДР}$ – потужність датчика руху в режимі очікування, кВт;
 $N_{ДР}$ – кількість датчиків руху, шт;
 $C_{Ш.ДР}$ – вартість володіння системою штучного освітлення, при її використанні з керуванням за допомогою датчиків руху, грн;
 $E_{АР}$ – економія коштів від використання системи керування з астрономічним реле, грн;
 $E_{ДР}$ – Економія коштів від використання системи керування з астрономічним реле, грн;
 $АПО_{300}$ – автономність природного освітлення, для освітленості 300 лк.
 $e_{СЗОК}$ – питома ефективність використання площі СЗОК, (год/рік)/м².

1. Вступ

Питання регулювання освітленості від штучних джерел світла (ДС) в приміщеннях різного призначення в США розглядалось ще в 2013 році, в результаті чого було розроблено стандарт ASHRAE 90.1-2013 [1]. Він акцентував увагу не тільки на зниженні інтенсивності та потужності освітлення, але й на пошуку шляхів досягнення економії електроенергії (ЕЕ) за рахунок використання додаткових елементів керування освітленням [2].

Оскільки будівельна індустрія поступово рухається у напрямку зведення будинків «нуль енергії» Міністерство енергетики США (DOE) в рамках програми Architecture 2030 [3] визнало, що управління освітленням відіграє суттєву роль в енергозбереженні. За оцінкою Управління енергетичної інформації США в 2019 році житловий і комерційний сектори США спожили близько 216 мільярдів кВт·год електроенергії на освітлення. Це становило близько 8% загального споживання електроенергії обома секторами і близько 5% загального споживання електроенергії в США. Споживання електроенергії в житловому секторі на освітлення складало близько 75 млрд. кВт·год. Це близько 5% від загального споживання

електроенергії в житловому секторі у 2019 році [4]. Впровадження систем управління освітленням здатне зменшити споживання ЕЕ до 60% без зниження комфорту та продуктивності праці [5].

В [6] проведено аналіз енергоефективності заміни ЛР на люмінесцентні та світлодіодні джерела світла. В даному дослідженні порівнювались їх світлотехнічні характеристики для освітлення робочої поверхні, а не сходових кліток і не проводились дослідження щодо доцільності використання системи керування штучним освітленням.

Найбільш енергоефективним джерелом світла в теперішній час є світлодіодні лампи (СДЛ), для яких встановлений досить жорсткий форм-фактор. Вони повинні мати форму, розміри і цоколь такі ж, як і у класичних ламп розжарення (ЛР). З технічної точки зору ця вимога абсолютно не логічна. Не можна переносити вимоги які оптимальні лише для ЛР, на СДЛ. Драйвер, який розміщується в корпусі лампи, одночасно виконує і роль радіатора. Але його поверхні не завжди вистачає для ефективного охолодження.

В багатоповерхових будинках освітлення сходів (маршів і майданчиків) та поверхових коридорів є важливим фактором комфорту та безпеки мешканців будинків. Впровадження СДЛ та автоматичних систем управління освітленням здатне знизити загальне споживання ЕЕ в кілька разів. Проте помилки при проектуванні таких систем, з точки зору надійності і безпеки користування, часто призводять до порушення вимог нормативних документів щодо освітленості і загальної безпеки мешканців.

Ще один пріоритетний напрямок розвитку в будівельній галузі – це зведення будівель зі зниженими експлуатаційними витратами. В рамках цього напрямку особливо важливим є завдання зниження витрат на освітлення будівель. Рішення даного завдання забезпечується впровадженням систем природного освітлення, коли будинок зведений таким чином, що вдень для освітлення приміщень, включаючи і коридори, максимально використовуються сонячне світло. І тільки в разі необхідності (ввечері та вночі), коли в зоні під'їзду або будь-якій іншій зоні всередині приміщення з'являється людина, автоматично включається штучне освітлення.

Дослідження впливу типології будівель міста Ербиль на якість і кількість денного світла, яке надходить в багатоповерхові житлові будинки (квартири) було проведено в [7]. Дослідження проведено в п'яти багатоповерхових будинках. В процесі досліджень були використані три типи симуляції: рівня освітленості, LEED і автономності природного освітлення. Встановлено, що типологія плану будівель має помітний вплив на енергоефективність природного освітлення приміщень багатоповерхових житлових будинків. Результати показали, що типологія з розміщенням квартир навколо коридору найкращим варіантом планування серед усіх розглянутих, з точки зору забезпечення оптимального використання денного світла, в той час як типологія з розміщенням квартир по обидві сторони коридору є гіршою. Автори прийшли до висновку, що типологія плану має очевидний вплив на ефективність природного освітлення в багатоповерхових житлових будинках

Яскравим прикладом енергоефективної забудови цілих мікрорайонів є діагональне проектування малоповерхового будівництва. Житлові та виробничі комплекси при такому способі забудови нагадують фрактальні природні утворення (рис. 1), властивості яких залежать від їх розмірів. Розробка й оснащення систем штучного освітлення автоматикою, яка реагує не тільки на присутність людини, але й на стан погоди однозначно сприяє економії ЕЕ при експлуатації будівель. Дослідження, представлене в [8], наводить обчислювальний метод, який дозволяє збільшити енергоефективність зовнішніх огорожувальних конструкцій за рахунок максимального використання сонячного світла. Він дає можливість передбачити тривалість надходження і якість сонячного світла, яке потраплятиме в приміщення, таким чином, він дозволяє проектанту моделювати огорожувальні конструкції з сонячної сторони, оптимізовані для різних цілей. Метод

спрямований на те, щоб допомогти архітекторам і проектувальникам моделювати екологічні будівлі та міську забудову.

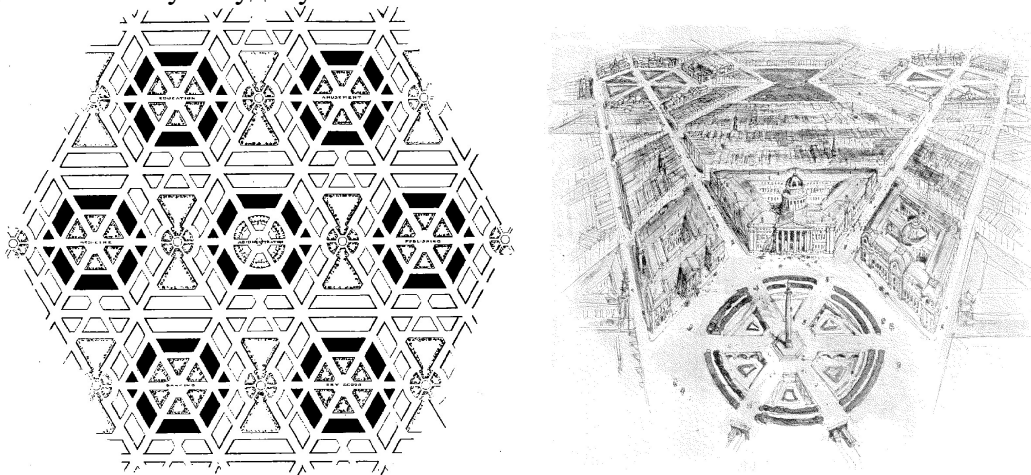


Рис. 1. Приклад ліагонального планування міста [9]

Питання енергоефективності керування системою світлодіодного освітлення в коридорах адміністративних приміщень розглядалось в [10]. Автором спроектовано та впроваджено освітлювальну установку з динамічним регулюванням світлового потоку світлодіодних ламп. Експлуатація досліджуваної освітлювальної установки протягом двох років довела перспективність такого підходу. Економія електроенергії за цей період склала 57%. Проте автор не досліджував питання енергоефективності використання різних типів джерела світла для освітлення сходів та поверхових коридорів. Дослідження енергоефективності використання природного світла для освітлення багатоповерхових будинків проводили в [11]. В цій статті представлено розрахунок економії теплової енергії, а також зменшення витрат на штучне освітлення за рахунок природного освітлення для будівлі SODHA BERS COMPLEX, розташованої в Варанасі, Індія. Потенціали енергозбереження і відповідно зниження викидів CO₂ були визначені для різних термінів експлуатації будівлі. Проте досліджень впливу природного освітлення на економію ЕЕ при освітленні сходів та поверхових коридорів не було проведено.

Результати досліджень масштабної моделі багатоповерхового житлового будинку щодо енергоефективності використання світлових колодязів у якості додаткового джерела світла представлені в [12]. У цьому дослідженні автори представили результати аналізу вимірювань освітленості в масштабній моделі енергозберігаючого багатоповерхового багатоквартирного будинку з використанням світлових колодязів в якості додаткового джерела денного світла. Конструкція будівлі була розміщена на компактній поздовжній основі. Вікна квартир мали схід-західну орієнтацію. Для додаткового природного освітлення центральних зон будівлі і в той же час для контролю приросту і втрат тепла були розроблені три типи інноваційних світлопровідних систем різних варіантів. Вимірювання освітленості в масштабних моделях проводилися під штучним небом. Найкращі результати виявилися у колодязя з дзеркальною внутрішньою поверхнею, широкою верхньою і вузькою нижньою частиною. Однак при цьому не розглядалось питання щодо економії ЕЕ на штучне освітлення за рахунок зменшення тривалості його роботи. В [13] автори розглянули графіки зайнятості для 35 одномісних офісних приміщень у великій офісній будівлі Сан-Франциско та отримали середню зайнятість як функцію часу доби. Крім того, в роботі визначено вплив датчиків присутності на частоту циклів вмикання/вимикання та термін служби ДС.

Дослідження щодо енергоефективності регулювання світлового потоку ДС наведено в [14]. Представлені в статті результати засновані на аналізі та узагальненні отриманих і опублікованих експериментальних даних, необхідних для визначення енергетичної

ефективності регулювання світлового потоку ДС. Аналіз енергоефективності проводився шляхом визначення питомих витрат на одиницю світлової енергії, виробленої протягом середньої тривалості світіння дешевими, малоефективними, але все ще дуже популярними тепловими і дорогими високоефективними напівпровідниковими джерелами світла. Проте питання щодо використання систем керування ДС не розглядалось.

Твердотільні ДС (SSL) є однією з найбільш енергоефективних та екологічно чистих технологій освітлення. Відповідно до [15] SSL вже мають високий рівень енергоефективності (більш 276 лм/Вт) при витратах, які постійно зменшуються. Крім того, термін служби світлодіодних ламп в кілька разів перевищує термін служби розрядних ламп. У дослідженні [15] представлений огляд сучасних тенденцій в технології SSL. Технологія SSL розвивається швидко, що може принести безліч переваг на ринку освітлення. Проте, все ще існують деякі ринкові бар'єри, які перешкоджають досягненню високорентабельного потенціалу енергозберігаючого освітлення. У статті [15] представлені кілька стратегій і рекомендацій для подолання існуючих бар'єрів і сприяння швидшому проникненню SSL на ринок. Передбачуваний потенціал економії за рахунок впровадження систем освітлення SSL в Європейському союзі становить близько 209 ТВт·год. Це відповідає 77 мільйонам тон CO₂ еквіваленту. Економічна доцільність виражається в еквіваленті річного виробництва електроенергії близько 26-ма великими електростанціями (1000 МВт).

Елементи управління денним освітленням (DLC) дозволяють скоротити витрати на електроенергію і максимально підвищити комфорт користувачів. Незважаючи на переваги, які це може принести, використання DLC досить обмежене через наступні фактори: труднощі при проектуванні, установці калібруванні, оцінюванні отриманої економії енергії та небажанням користувачів їх встановлювати. Кожна фаза процесу розробки DLC, від початкової оцінки можливості впровадження системи природного освітлення до установки, калібрування системи та виявлення причин, що обмежують їх поширення, описана в [16].

В роботах [17, 18] пропонується методика нової структури аналізу природного освітлення житлових будинків. Вона складається з двох параметрів, які відображають денну та сезонну доступність природного світла, а також середню тривалість доступу до прямої сонячної радіації. Показано, що завдяки використанню запропонованої методики можна виявити значні і дієві якісні відмінності між квартирами, які в процесі проектування не враховувались. Вона також має кілька рівнів деталізації, які варіюються від простого розрахунку до просторових графіків і дозволяють розробникам моделей не тільки зрозуміти, але й оптимізувати характеристики природного освітлення кімнат, житлових будинків або районів.

Метод для визначення не тільки найкращого розміщення фотодатчика на стелі, але й оптимальної його орієнтації на основі аналізу декількох критеріїв, представлений в [19]. Використовувались наступні критерії: 1) співвідношення рівнів освітленості на робочій поверхні і на стелі; 2) отримана економія ЕЕ; 3) достатність освітлення, яка визначалась як відношення тривалості нормованої освітленості від природних і штучних ДС до тривалості робочого часу. Методологія [19] може бути використана як інструмент для визначення оптимальної роботи системи фотодатчиків, які реагують на денне світло. Її також можна використовувати як частину процедури перевірки, перед веденням в експлуатацію системи, що реагує на денне світло. Вона гнучка, а саме: 1 – в процедуру розрахунку можна додавати нові критерії (C₄, C₅, ... C_x); 2 – можна максимізувати або мінімізувати вплив кожного з існуючих критеріїв, використовуючи відповідні вагові коефіцієнти. Хоча в представленому варіанті, вага всіх трьох розглянутих критеріїв була однаковою.

Зменшення споживання ЕЕ при використанні чотирьох варіантів систем керування природним світлом, з врахуванням використання стандартних вимикачів, а також їх комбінації з автоматичним датчиками присутності, представлено в [20]. В ході дослідження було розглянуто декілька приміщень з різною: 1 – доступністю природного світла; 2 –

орієнтацією СЗОК; 3 – системою сонцезахисних пристроїв, розташованих на ділянках в різних широтах і кліматичних умовах, а також з урахуванням двох типів будівель: офісів і навчальних класів. Результати показали, для яких комбінацій змінних можна досягти економії 20% і 30% за допомогою засобів димерування і присутності.

У статті [21] розглянуто ряд технологій освітлення (на змінному і постійному струмі) разом з встановленням двох систем вловлювання денного світла для освітлення типової класної кімнати в грецькій державній школі. Перша для оцінки економії ЕЕ і достатнього рівня освітлення використовує один автономний фотодатчик на світильнику, а друга – в зоні керування. Доведено, що існуюче річне споживання ЕЕ ($90,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$) на освітлення може бути зменшено до $0,55 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$. Максимальне щорічне скорочення викидів CO_2 до $32,44 \text{ кг}/\text{м}^2$. В перерахунку на всю країну це 201929 тон CO_2 еквіваленту. Підкреслено, що шлях до шкільних будівель з нульовим споживанням енергії повинен базуватися не тільки на використанні систем керування штучним освітленням, але й на максимальному використанні природного світла.

В огляді літератури в [22] показано світлову ефективність різних компонентів і світлопроводів для всієї системи освітлення. Додатковий світловий потік денного світла, для різних погодних умов і сезонів протягом усього року також був врахований в розглянутих дослідженнях відповідно до вимог щодо освітлення офісів. На цій підставі були зроблені висновки. Оскільки дослідження проводилися в основному архітекторами, інженерами-будівельниками або фізиками, вимоги до освітлення не були жорсткими. Авторами встановлено, що система управління освітленням повинна підлаштовуватись під умови переважно денного світла. Це обумовлено тим, що найбільша економія енергії виникає тоді, коли природне світло поєднано з керуванням штучним (вмиканням-вимкненням), а розсіяне – із димеруванням штучних ДС.

Проект розумних датчиків зайнятості, які можуть адаптуватися до змін рівня активності працівника (мешканця) представлено в [23]. В ньому ж запропоновано і модель з «переміщенням людини», яка працює за комп'ютером. Розумний датчик зайнятості може встановити відхилення рівня активності працівника за часом доби. За цією інформацією, він може змінити час затримки системи керування штучним освітленням відповідно до часу дня. Проте в обох дослідженнях вся увага була зосереджена на офісних приміщеннях, освітлення сходів та поверхових коридорів залишилось поза увагою. В нежитлових будівлях встановлена невідповідність прогнозованого електроспоживання виміряному [24]. Авторами підкреслено, що це обумовлено браком інформації щодо фактичного споживання енергії в будівлях.

Дослідження, щодо виявлення присутності мешканців приватних домогосподарств проводились в [25]. Мета дослідження полягала в тому, щоб вивчити взаємозв'язок між сумарним споживанням електроенергії в приватних домогосподарствах і присутністю мешканців в ньому. Автори оцінили достовірність розроблених алгоритмів на основі аналізу трьох наборів даних, що містять основну інформацію про реальне електроспоживання домогосподарствами. Найбільш ефективний алгоритм показав точність прогнозування споживання електроенергії 69-90%.

Під час досліджень енергоефективності систем керування штучним освітленням [26], проведених в офісних приміщеннях, авторами виділено кілька підходів, які дозволять зменшити витрати енергії. Результати дослідження показали, що кожна протестована система може бути оптимізована таким чином, щоб економія електроенергії знаходилась в межах від 50% до 70%.

Дослідження споживання електроенергії в багатоповерхових будинках для освітлення місць загального користування протягом 2009 – 2010 р.р. наведено в [27, 28]. Авторами розглянуто енергоспоживання системою штучного освітлення 89 багатоквартирних будинків м. Тернопіль, Україна. В результаті дослідження встановлено, що найбільша витрата

електроенергії спостерігається в період від 01.11 по 01.03, оскільки тривалість роботи системи освітлення в цей період досягає 18 год/добу. З 01.03 по 01.06 середня тривалість роботи системи штучного освітлення становить 14 год/добу, з 01.06 по 01.09 – 8 год/добу і з 01.09 по 01.11 – 14 год/добу. Виходячи з отриманих результатів встановлено, що найбільша витрата електроенергії спостерігається в осінньо-зимовий період, а найменша – в літній. Виходячи з цього, запропоновано спосіб ефективного використання електроенергії для освітлення сходів і під'їздів будинків за рахунок встановлення вимикачів освітлення з датчиками руху.

Керування системою штучного освітлення на основі використання датчиків присутності може привести до 40% економії ЕЕ при умові використання комбінації сучасних стратегій управління, таких як: 1 – використання денного світла; 2 – визначення режиму зайнятості мешканців; 3 – планування і відключення зайвого навантаження [29]. Не зважаючи на концептуальні переваги підходів до управління будівлями, які враховують присутності мешканців, їх доцільність повинна бути підтверджена реальними дослідженнями.

Огляд літератури з управління освітленням на основі використання датчиків руху які дозволяють створювати сенсорну мережу для управління будівлею проведено в [30]. Сучасні системи використовують окремі точки вимірювання для визначення присутності, що призводить до невизначеності, яка пов'язана з виявленням присутності людини. Тривала затримка і висока чутливість датчиків компенсують цю невизначеність, але призводять до зменшення економії електроенергії. Більш ефективно управління можна забезпечити за рахунок ширшого зондування, використання мережі датчиків присутності і аналізу отриманих даних в реальному часі. Представлені результати вказують на доцільність дослідження ефективності сенсорних мереж для управління штучним освітленням.

В огляді літератури [31] показано, що теоретичні розрахунки, вимірювання в повномасштабних приміщеннях і моделювання до затверджених програм освітлення показують, що питоме споживання ЕЕ $10 \text{ кВт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\cdot\text{рік})$ є реалістичною метою для електричного освітлення в майбутніх офісних будівлях з низьким споживанням енергії. Ця мета призведе до значного зниження енергоємності, не менше ніж на 50%, у порівнянні з фактичним середнім споживанням електроенергії на освітлення ($21 \text{ кВт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\cdot\text{рік})$ в Швеції). Представлені та обговорені стратегії щодо скорочення використання енергії для електричного освітлення, які включають в себе: підвищення енергоефективності ДС, баластів і світильників, використання природного світла, поліпшення коефіцієнта технічного обслуговування, розумного використання датчиків ручного димерування і відключення. Представлені також і стратегії, засновані на використанні денного світла. Обговорюються і такі питання як: вплив характеристик СЗОК, властивостей сонцезахисних пристроїв, відбивної здатності внутрішніх поверхонь, стелі і висоти перегородок. Дане дослідження вказує на необхідність оптимізації параметрів штучного освітлення для зменшення навантаження на енергетичну систему, яке постійно зростає у зв'язку з електрифікацією усіх процесів та пристроїв, які використовуються, як на підприємствах так і у повсякденному житті. Яскравим прикладом цього є електромобілі, які все більше завойовують автомобільний ринок, збільшуючи навантаження на електроенергетичну систему усіх країн.

В роботі [32] представлений огляд літератури на тему енергоефективної модернізації систем штучного і денного освітлення в будівлях. В огляді, що охоплює близько 160 наукових статей, розглядаються наступні теми: а) модернізація штучного освітлення в будівлях; б) використання електроенергії і потенціалу з енергозбереження; в) стратегія модернізації освітлення. Стратегії модернізації, описані в огляді: заміна лампи, баласту або світильника; використання заданого дизайну освітлення навколишнього середовища; поліпшення обслуговування; зниження підтримуваних рівнів освітленості; поліпшення кольоропередачі джерел світла; поліпшення самопочуття мешканців; використання систем управління і систем денного світла. Огляд вказує на те, що існуючі загальні знання про

модернізацію освітлення в даний час дуже обмежені і є брак інформації щодо фактичних енергетичних характеристик систем освітлення, встановлених в існуючому будівельному фонді.

Огляд [33] показує, що системи управління освітленням можуть забезпечити значну економію енергії і привести до зниження витрат на електроенергію. Зниження попиту на електроенергію також має позитивний вплив на навколишнє середовище в результаті скорочення викидів вуглекислого газу. Але кожна з технологій керування має різні властивості, які впливають на їх продуктивність. Як видно з обговорень в цій статті, характер поведінки мешканців, геометричні властивості приміщення або будівлі, надходження сонячного світла, тип виконуваної роботи і т. д. мають великий вплив на системи керування освітленням. Тільки при належному вивченні цих факторів можна виконати відповідне впровадження технологій, яке може привести до значної економії енергії, а також до забезпечення комфорту мешканців.

Вплив освітленості на відчуття комфорту на робочих місцях офісних працівників проаналізовано в [34]. Дослідження проводилось в типові робочі дні. Порівнювалася освітленість, на рівні очей і на робочій поверхні, враховувались також і деякі показники природного освітлення (корисна денна освітленість і вірогідність відблисків денного світла). Підкреслено, що подібні явища можуть спостерігатися при певних погодних умовах. Дискомфорт також пов'язаний з конкретними моментами дня і погодними умовами. Відповідність між показниками денної продуктивності і відгуками працівників спостерігалися не завжди.

У статті [35] автори представляють дослідження систем керування освітленням, принцип керування яких залежав від режиму роботи мешканців, в 12-тижневому експерименті в реальних умовах в шести офісах з десятьма учасниками. В результаті з'ясувалося в цілому задоволення користувачів результатами, за винятком тих, які вважають автоматичне керування освітленням неважливим. Дія «Вмикання освітлення» практично ніколи не скасовувалась, в той час як дія «Вимкнення» була коректною більш ніж в 75% випадків. В результаті встановлено середнє нормалізоване споживання електроенергії на 13,4% без істотного впливу на комфорт мешканців.

З вище викладеного випливає, що питання економічної та енергетичної ефективності систем керування штучним освітленням сходів багатоповерхових житлових будинків в існуючих публікаціях висвітлені недостатньо повно. Саме це і вказує на необхідність проведення досліджень щодо визначення економічної та енергетичної ефективності використання систем керування штучним освітленням за допомогою астрономічного реле та датчиків руху з різними типами джерел світла для сходів (майданчиків та маршів) багатоповерхових житлових будинків.

2. Основна частина

У наших попередніх дослідженнях основна увага приділялася підвищенню ефективності використання денного світла [36] і впливу світлопрозорих структур оболонки зовнішньої стіни на енергетичний баланс приміщень [37]. Наступним кроком у вивченні способів підвищення енергоефективності систем освітлення було визначення впливу систем управління штучним освітленням на споживання електроенергії освітленням сходових клітин.

Оцінка доцільності використання систем керування штучним освітленням проведена з врахуванням енергоефективності джерел світла, а саме: при застосуванні ЛР, компактних люмінесцентних ламп (КЛЛ) та СДЛ. Відповідно до будівельного стандарту України: «Природне і штучне освітлення» [38], освітленість сходових майданчиків та маршів повинна бути не нижче 20 лк. Потужності джерел світла обрано таким чином, щоб їх світлові потоки були близькими за значенням. Для ЛР це 40 Вт [39, 40], – 30 Вт [41, 42] для КЛЛ – 7 Вт [43,

44], для СДЛ – 5 Вт [45, 46]. Вартість заміни встановлено відповідно до [47]. Технічні характеристики ДС наведено в табл. 1. На кожному поверсі встановлено по два однолампових світильника (рис. 2).

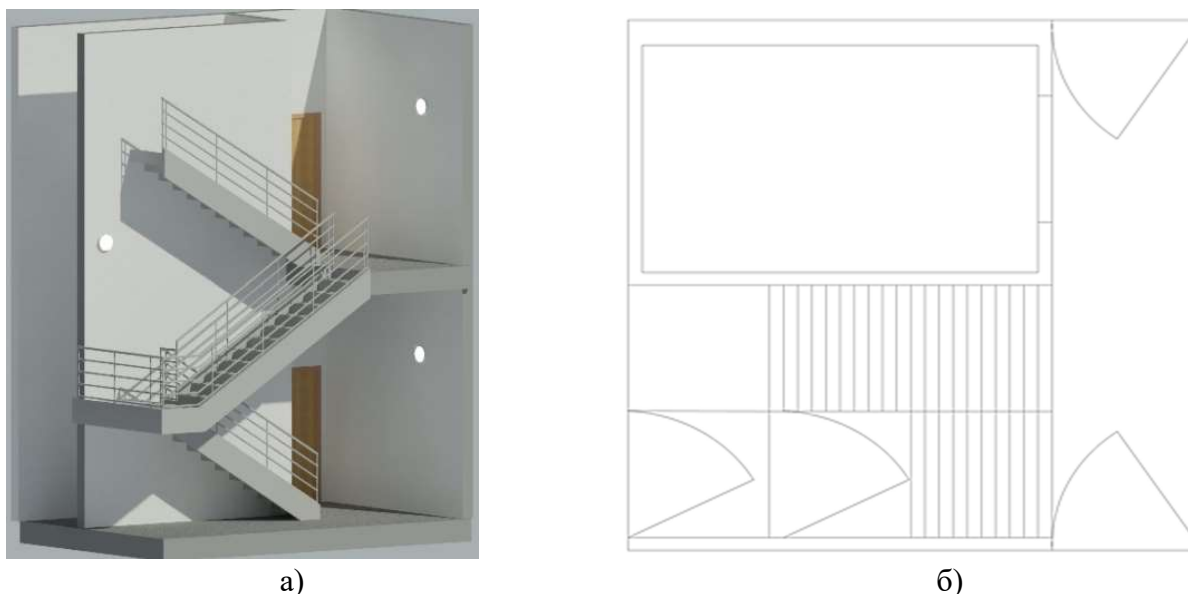


Рис. 2. Візуальне зображення типового під'їзду (а) та схема першого поверху сходових кліток (б)

Дані щодо технічних характеристик і вартостей ДС наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики ДС

Параметр	OSRAM Classic A FR (ЛР)	Classic A Eco Pro (ГЛР)	FS-7-4200 (КЛЛ)	Global C37 CL-F (СДЛ)
Потужність, кВт	0,04	0,03	0,007	0,005
Світловий потік, лм	415	405	440	400
Світловіддача, лм/Вт	10,4	13,5	62,9	80
Колірна температура, К	4000	2700	4200	3000
Термін служби, год	1000	2000	8000	20000
Вартість, грн	11	44	14	27
Вартість заміни, грн	20	20	20	20
Кількість циклів вмикання до відмови	4000	8000	8000	10000

2.1. Система штучного освітлення з астрономічним реле

Для проведення розрахунків щодо енергоефективності використання астрономічного реле визначимося з тривалістю темного і світлого періодів доби, відповідно до яких працюватиме система керування штучним освітленням на сходових майданчиках. Для м. Тернопіль тривалість темного і світлого періодів доби для кожного місяця згідно з даними сайту [48] наведено на рис. 3.

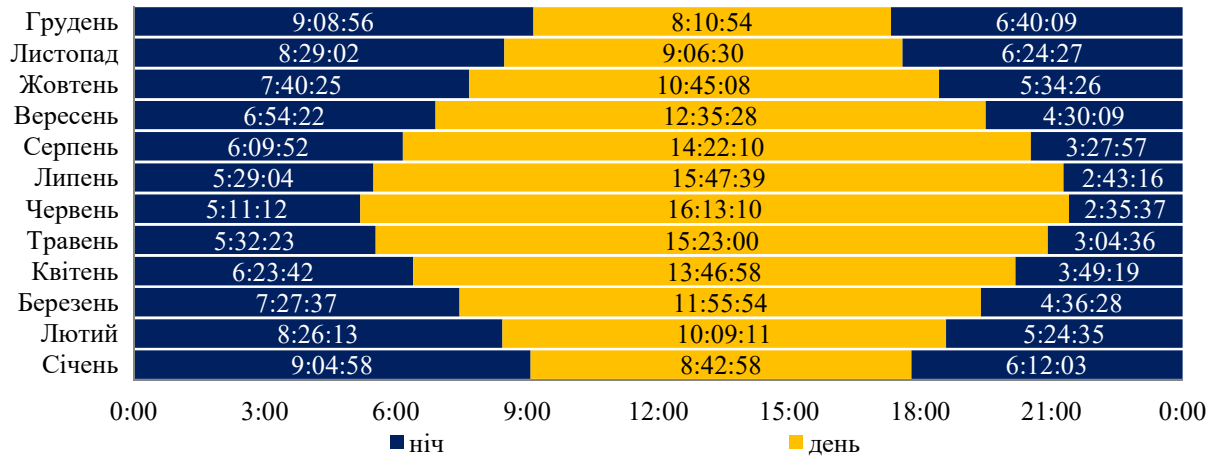


Рис. 3. Середньомісячна тривалість темного і світлого періодів доби для м. Тернопіль, Україна

Відповідно до рис. 3, тривалість світлого дня змінюється від 8 год 11 хв в грудні до 16 год 13 хв у червні. Частка світлого дня в структурі доби протягом року для м. Тернопіль, становить 51% від загальної тривалості року. Це свідчить про доцільність використання систем суміщеного освітлення не тільки для житлових приміщень, але й сходів та поверхових коридорів.



Рис. 4. Зображення астрономічного реле РЭВ-225 [49]

Для керування системою штучного освітлення обрано астрономічне реле часу РЭВ-225 (рис. 4). Його вартість, технічні характеристики, витрати на встановлення і налаштування взяті з інтернет ресурсу [49] відповідно до даних сайту [47]. Для м. Тернопіль, Україна, вони зведені в табл. 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики астрономічного реле часу РЭВ-225

Параметр	Значення
Споживана потужність (від мережі ~230 В), в режимі очікування, Вт,	не більше 1,3
Програма	Астрономічна
Режими роботи	Автоматичний; ручний
Допустиме відхилення часу	≤ 1 с/день при 20°C
Ступінь захисту	IP20
Вартість, грн	850
Вартість встановлення / налаштування, USD	3,82/3,82

2.2. Інтенсивності руху мешканців 9-ти поверхових будинків через дверний проріз першого поверху

Для визначення енергоефективності використання системи керування штучним освітленням за допомогою датчиків руху, необхідно визначити середню інтенсивність руху мешканців будинків. В дослідженні розглядалися житлові 9-ти поверхові будинки. Для забезпечення відтворюваності результатів досліджень кількість об'єктів (будинків), згідно з статистичним G-критерієм Кохрена була прийнятою рівною дев'яти [50]. Результати дослідження представлені у фактичних одиницях вимірювання (мешк/год). Для узагальнення результатів досліджень зняття показів було проведено не в конкретні години початку і кінця дня (рис. 3), а на початку і в кінці тригодинних часових проміжків. З 7:00 до 10:00 та на початку і в кінці 9-ти годинного інтервалу з 22:00 до 07:00. Заміри проводилися протягом року. Для цього використовувалися механічні лічильники кількості проходжень мешканцями будинку дверного прорізу першого поверху. Дослідження проводилися в наступні проміжки часу: з 7:00 до 10:00; з 10:00 до 13:00; з 13:00 до 16:00; з 16:00 до 19:00; з 19:00 до 22:00; і з 22:00 до 07:00.

Отримані дані в межах вказаних проміжків часу були усереднені. Це дало можливість побудувати відповідну гістограму (рис. 5).

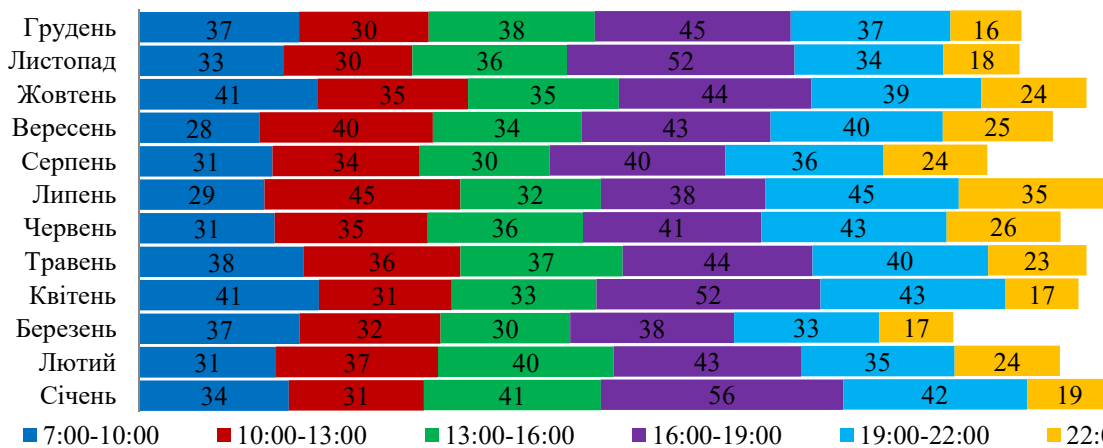


Рис. 5. Гістограма середньої інтенсивності руху мешканців 9-ти поверхових будинків через дверний проріз першого поверху в межах 3-годинних проміжків часу, починаючи з 7:00 до 22:00 і 9-ти годинного інтервалу з 22:00 до 07:00

Результати підрахунків середньої добової інтенсивності руху мешканців будинків через дверний проріз у межах вказаних часових проміжків (див. рис. 5) зведено в табл. 3.

Таблиця 3

Середньодобова інтенсивність руху мешканців через дверний проріз, мешк./добу*

Середня добова інтенсивність руху мешканців через дверний проріз, раз/добу					
Січень	223	Травень	218	Вересень	210
Лютий	210	Червень	212	Жовтень	218
Березень	187	Липень	224	Листопад	203
Квітень	217	Серпень	195	Грудень	203

З табл. 3 випливає, що найбільша середня інтенсивність руху мешканців спостерігається в межах з 16:00 до 19:00 год. Найменша – з 22:00 ночі до 7:00 ранку. Це вказує на доцільність впровадження автоматизованого управління моментами включення/виключення системи освітлення на сходах та поверхових коридорах в нічні періоди часу замість безперервного їх освітлення.



Рис. 6. Інфрачервоний датчик руху DR-08 [51]

Для керування системою штучного освітлення обрано датчики руху F&F DR-08 (рис. 6). Технічні характеристики яких, отримані з інтернет ресурсу [51, 52], а також вартість його встановлення та налаштування, відповідно до даних сайту [47] для м. Тернопіль, наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Технічні характеристики датчика руху F&F DR-08

Параметр	Значення
Споживана потужність, Вт	0,45
Час спрацювання, с	10
Ступінь захисту	IP 20
Кут виявлення, °	360
Затримка вимкнення, с	3-540
Відстань виявлення, м	2
Температурний режим експлуатації, °С	від -10 до +40
Вартість, грн	593
Вартість встановлення, грн	220

Згідно з даними дослідження [53], у 95% випадків тривалість перебування мешканців в коридорі не перевищує 60 секунд, а на сходах – 20 секунд. Відповідно до [53] тривалість світіння ДС потрібно приймати рівною 30 с, тобто $30/3600 = 0,0083$ год. Це обумовлено тим що саме при такій тривалості світіння ДС енергоефективність системи штучного освітлення як коридорів, так і сходових кліток максимальна.

3. Результати дослідження

На основі отриманих даних визначено енергоефективність наступних систем керування освітленням сходів та поверхових коридорів 9-ти поверхових будинків: 1 – без систем керування (режим безперервного світіння); 2 – при наявності одного астрономічного реле, запрограмованого таким чином, щоб світло вмикалося в момент початку астрономічних сутінок ввечері і вимикалося в момент їх закінчення зранку; 3 – при встановленні датчиків руху на кожному поверсі дев'ятиповерхових будинків.

3.1. Витрати коштів та електроенергії при використанні системи штучного освітлення в режимі безперервного світіння

Потужність системи штучного освітлення визначалася за виразом (1):

$$P_{\text{ШО}} = P_{\text{ДС}} \cdot N_{\text{ДС}} \cdot N_{\text{П}}, \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (1)$$

де $P_{\text{ШО}}$ – потужність ДС, кВт;

$N_{\text{ДС}}$ – кількість ДС на одному поверсі, шт;
 $N_{\text{П}}$ – кількість поверхів в будинку, шт.

Сумарне річне споживання ЕЕ системою штучного освітлення визначалося за виразом (2):

$$W_{\text{ШО}} = P_{\text{ШО,ДС}} \cdot T_{\text{р}}, \text{ кВт}\cdot\text{год}, \quad (2)$$

де $T_{\text{р}}$ – річна тривалість світіння ДС на сходах (маршах та майданчиках) будинків, год/рік.

Для системи штучного освітлення 1, без застосування системи керування, тривалість її роботи, в режимі безперервного світіння протягом року дорівнює $T_{\text{р}} = 365 \cdot 24 = 8760$ год. Тоді для кожного з вибраних ДС річне споживання ЕЕ системою штучного освітлення наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Потужність систем штучного освітлення та їх щорічне споживання ЕЕ для різних ДС

Тип ДС	$P_{\text{ШО}}$, кВт	$W_{\text{ШО}}$, кВт·год/рік
ЛР	0,720	6307,200
ГЛ	0,540	473,0400
КЛЛ	0,162	1103,760

Вартість володіння системою штучного освітлення (C_{AL}), при її використанні в режимі безперервного світіння визначено за формулою (3)

$$C_{\text{ШО}} = C_{\text{П}} + ((C_{\text{ДС}} + C_3) \cdot N_{\text{В,ДС}} + P_{\text{ШО}} \cdot T_{\text{р}} \cdot C_{\text{ЕЕ}}) \cdot N_{\text{П}}, \text{ грн} \quad (3)$$

де $C_{\text{П}}$ – початкова вартість необхідних ДС та пристроїв керування для системи штучного освітлення сходів та поверхових коридорів, USD;

$C_{\text{ДС}}$ – вартість одного ДС, USD;

C_3 – вартість заміни одного ДС, USD;

$N_{\text{В,ДС}}$ – кількість ДС, які вийшли протягом обраного періоду, шт;

$C_{\text{ЕЕ}}$ – вартість ЕЕ, USD/(кВт·год).

Кількість ДС, які вийдуть з ладу протягом обраного періоду визначається за формулою (4)

$$N_{\text{В,ДС}} = T_{\text{н,ДС}} / T_{\text{ДС}}, \text{ Qty}, \quad (4)$$

де $T_{\text{н,ДС}}$ – номінальна тривалість роботи ДС, год.

Відповідно до даних Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, вартість ЕЕ ($C_{\text{ЕЕ}}$) енергопостачальної компанії ВАТ «Тернопільобленерго» для споживачів 2-го класу напруги (до яких відносяться юридичні особи, які оплачують освітлення сходів (маршів та майданчиків) становить 2,415 грн/кВт·год.

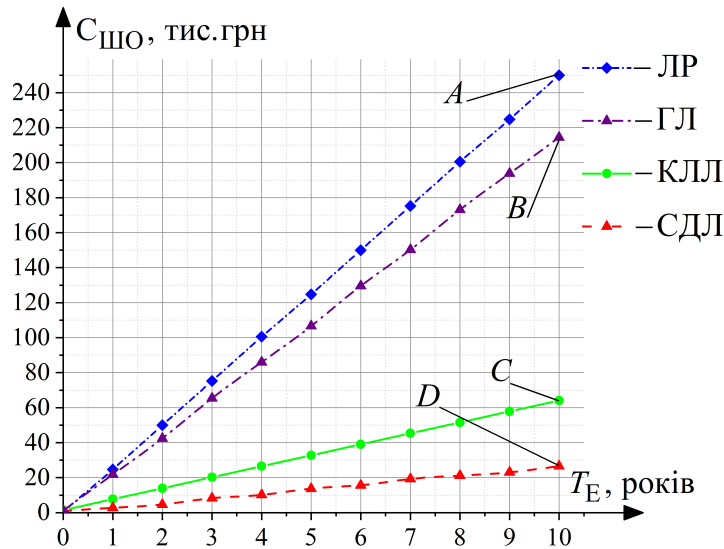


Рис. 7. Залежність вартості володіння системою штучного освітлення ($C_{\text{ШО}}$, грн) від терміну її експлуатації (T_E , років) для ДС різного типу в режимі безперервного світіння

Як видно з рис. 7, вартість володіння системою штучного освітлення з ЛР 249969 грн (рис. 7, т. А) через десять років експлуатації буде на 14,20% більшою, ніж з ГЛ (214 463 тис. грн) (рис. 7, т. В), на 84,19% більшою, ніж з КЛЛ (39508 грн) (рис. 7, т. С) і на 89,34% більшою, ніж з СДЛ (26654 грн) (рис. 7, т. D).

3.2. Енергетична та економічна ефективність використання системи керування штучним освітленням за допомогою астрономічного реле

Наступним розглянемо варіант використання астрономічного реле, яке вмикає і вимикає систему штучного освітлення з прив'язкою до астрономічного часу (схід / захід сонця).

ЕЕ, яка буде спожита астрономічним реле протягом року ($W_{\text{АР}}$) визначалася за формулою (5)

$$W_{\text{АР}} = P_{\text{АР}} \cdot T_{\text{Р}}, \text{ (кВт} \cdot \text{год) / рік,} \quad (5)$$

де $P_{\text{АР}}$ – потужність астрономічного реле, кВт;

За рік астрономічне реле РЭВ-225, при максимальній потужності 1,3 Вт споживає $W_{\text{АР}} = 0,0013 \cdot 8760 = 11,388$ (кВт·год)/рік.

Сумарне річне споживання ЕЕ системою штучного освітлення з астрономічним реле визначено за формулою (6)

$$W_{\text{ШО.АР}} = P_{\text{ШО}} \cdot T_{\text{ДС}} + W_{\text{АР}}, \text{ (кВт} \cdot \text{год) / рік,} \quad (6)$$

де $T_{\text{ДС}}$ – тривалість роботи ДС, год/рік

Результати розрахунку помісячного споживання ЕЕ системою освітлення з астрономічним реле наведено в рис. 7.

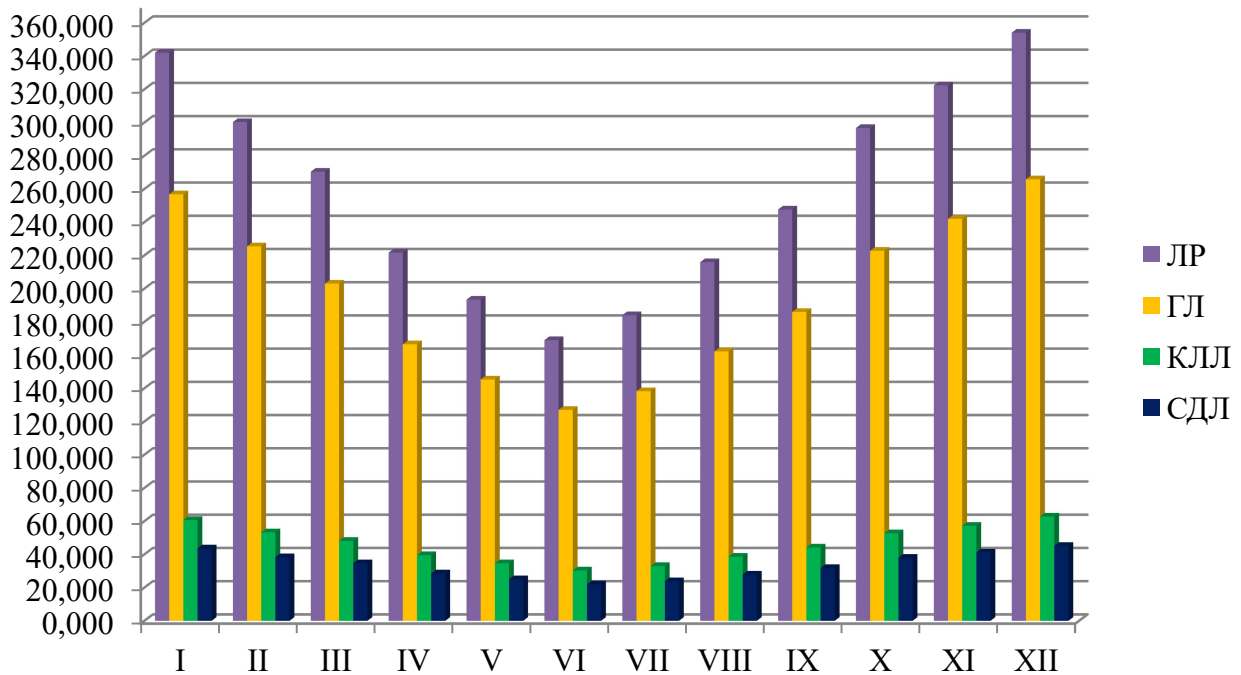


Рис. 8. Помісячне споживання ЕЕ системою штучного освітлення для кожного типу ДС, при використанні астрономічного реле, кВт·год/міс

Річне споживання ЕЕ для кожного типу ДС, при використанні системи штучного освітлення з одним астрономічним реле, відповідно до рис. 8, становить

$$W_{\text{ШО.АР.ЛР}} = 2340,824 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік};$$

$$W_{\text{ШО.АР.ГЛ}} = 2340,824 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік};$$

$$W_{\text{ШО.АР.КЛЛ}} = 554,923 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік};$$

$$W_{\text{ШО.АР.СДЛ}} = 399,627 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}.$$

Як бачимо, при суміщеному освітленні сходів та поверхових коридорів з використанням астрономічного реле можна зменшити споживання ЕЕ на 50,58% для ЛР (з 6307,200 до 3117,302 кВт·год/рік), 50,52% для ГЛ (з 4730,400 до 2340,824 кВт·год/рік), на 49,72% для КЛЛ (з 1103,760 до 554,923 кВт·год/рік) і на 49,31% для СДЛ (з 788.400 до 399.627 кВт·год/рік).

Розглянемо енергоефективність використання астрономічного реле для керування штучним освітленням сходів та поверхових коридорів вночі. Одне астрономічне реле вмикає світло у під'їзді ввечері у момент закінчення світлового дня і вимикає в момент його початку (див. рис. 3).

Вартість володіння системою освітлення, при її використанні з керуванням за допомогою астрономічного реле визначаємо за наступною формулою (7)

$$C_{\text{ШО.АР}} = C_{\text{П}} + ((C_{\text{ДС}} + C_{\text{З}}) \cdot N_{\text{ВДС}} + P_{\text{ДС}} \cdot T_{\text{ДС}} \cdot C_{\text{ЕЕ}}) \cdot N_{\text{П}} + (C_{\text{В}} + W_{\text{АР}} \cdot C_{\text{ЕЕ}}) \cdot N_{\text{АР}}, \text{ грн}, \quad (7)$$

де $N_{\text{АР}}$ – кількість астрономічних реле, шт;

$C_{\text{В}}$ – вартість робіт по встановленню та налаштуванню пристроїв керування, USD;

$W_{\text{АР}}$ – ЕЕ спожита системою керування за рік, кВт·год/рік;

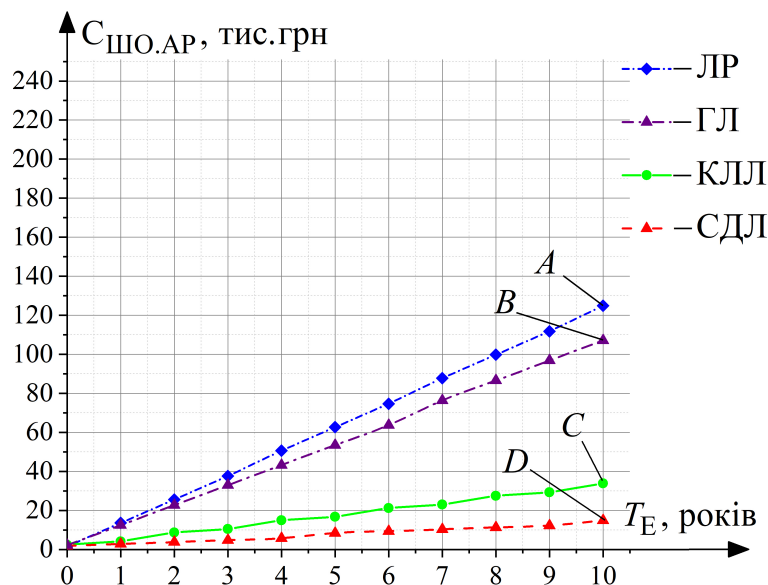


Рис. 9. Залежність вартості володіння системою освітлення ($C_{\text{ШО.АР}}$, грн), з астрономічним реле, від терміну експлуатації (T_E , років) для ДС різного типу

Відповідно до результатів, представлених на рис. 5.10, вартість володіння системою штучного освітлення на базі ЛР з астрономічним реле (124879 грн) (рис. 9, т. А) за десять років експлуатації на 14,22% більша, а ніж з ГЛ (107117 грн) (рис. 9, т. В), на 83,04% більшою, а ніж з КЛЛ (21183 грн) (рис. 9, т. С) і в 88,04% більшою, а ніж з СДЛ (14931 тис. грн) (рис. 9, т. С).

3.3. Енергетична та економічна ефективність використання системи керування штучним освітленням за допомогою датчиків руху

Розглянемо варіант використання системи штучного освітлення сходів та поверхових коридорів з керуванням за допомогою датчиків руху. Для визначення енергоспоживання системою штучного освітлення з датчиками руху необхідно визначити кількість їх спрацювань. Дані з рис. 4 використані для оцінки руху мешканців по поверхах (табл. 6)

Таблиця 6

Помісячна інтенсивності руху мешканців 9-ти поверхових будинків

Місяць	1*	2**	3***
Грудень	6 923	6 152	13 075
Листопад	5 922	5 264	11 186
Жовтень	5 797	5 152	10 949
Вересень	6 473	5 752	12 225
Серпень	6 529	5 800	12 329
Липень	6 350	5 648	11 998
Червень	6 921	6 152	13 073
Травень	6 038	5 368	11 406
Квітень	6 296	5 600	11 896
Березень	6 746	6 000	12 746
Лютий	6 068	5 392	11 460
Січень	6 283	5 584	11 867
За рік	76 346	67 864	144 210

1* – інтенсивність руху мешканців через 1 поверх, мешк/міс

2** – середня місячна інтенсивність руху мешканців через поверхи з 2 по 9, мешк/міс

3*** – сумарна інтенсивність руху мешканців за місяць, мешк /міс

При використанні датчиків руху, для визначення енергоспоживання системою штучного освітлення необхідно визначити кількість їх спрацювань.

Як видно з табл. 5, сумарно за рік мешканці 9-ти поверхових будинків вмикатимуть освітлення (проходитимуть повз датчики руху) 144 210 раз. Це з урахуванням того, що мешканці поверхів з 2 по 9 з першого поверху і назад переміщатимуться виключно ліфтом. Враховуючи, що середня кількість мешканців в розглянутих випадках становила 71, то отримуємо, що в середньому кожен мешканець проходив через вхід в будинок 2,95 (76346/(365·71)) раз/добу.

ЕЕ, спожиту датчиками руху за рік ($W_{др}$) визначаємо за формулою (8)

$$W_{др} = P_{др} \cdot N_{др} \cdot T_p, \text{ (кВт·год)/рік}, \quad (8)$$

де $P_{др}$ – потужність датчика руху в режимі очікування, кВт;

$N_{др}$ – кількість датчиків руху, шт.

За рік датчик руху F&F DR-08, при потужності 0,45 Вт в режимі очікування споживатиме $W_{др} = 0,00045 \cdot 9 \cdot 8760 = 35,478$ (кВт·год)/рік.

Для визначення споживання ЕЕ системою штучного освітлення за рік використано формулу (9)

$$W_{ш.др} = N_{дс} \cdot P_{дс} \cdot I_{р.м} \cdot T_{дс} + W_{др}, \text{ кВт·год} \quad (9)$$

де $N_{дс}$ – кількість ДС на одному поверсі, шт;

$P_{дс}$ – потужність ДС, кВт;

$I_{р.м}$ – інтенсивність руху мешканців будинку, раз/рік;

$W_{др}$ – ЕЕ, спожиту датчиками руху за рік, (кВт·год)/рік,

$$W_{ш.др.лр} = 2 \cdot 0,04 \cdot 144210 \cdot 0,0083 + 35,478 = 131,233 \text{ кВт·год/рік};$$

$$W_{ш.др.гл} = 2 \cdot 0,03 \cdot 144210 \cdot 0,0083 + 35,478 = 107,295 \text{ кВт·год/рік};$$

$$W_{ш.др.клл} = 2 \cdot 0,007 \cdot 144210 \cdot 0,0083 + 35,478 = 52,235 \text{ кВт·год/рік};$$

$$W_{ш.др.сдл} = 2 \cdot 0,005 \cdot 144210 \cdot 0,0083 + 35,478 = 47,447 \text{ кВт·год/рік}.$$

Отже, при освітленні сходів та поверхових коридорів з використанням датчиків руху споживання ЕЕ можна зменшити на 97,92% для ЛР (з 6307,200 до 131,233 кВт·год/рік), на 97,73% (з 4730,400 до 107,295 кВт·год/рік), на 95,27% (з 1419,120 до 52,235 кВт·год/рік) для КЛЛ і на 93,98% для СДЛ (з 788,400 до 47,447 кВт·год/рік).

Також слід звернути увагу на те, що система керування штучним освітленням на базі датчиків руху споживає за рік (35,478 кВт·год/рік) ЕЕ, в той час, як вибрані для досліджень ДС: з (ЛР – 95.754 кВт·год/рік; ГЛ – 71,816 кВт·год/рік; КЛЛ – 16.757 кВт·год/рік; СДЛ – 11.969 кВт·год/рік).

Відповідно до [54], оскільки тривалість світіння ДС не є великою, а число циклів вкл/викл значним, кількість ламп, які вийдуть з ладу при врахування режиму частих включень буде такою, яка наведена в табл. 7. В даному випадку кількість ДС, які вийдуть з ладу визначається за формулою (10)

$$N_{в.дс} = N_{ц} / N_{н.ц}, \text{ шт}, \quad (10)$$

де $N_{ц}$ – кількість циклів вмк/вимк ДС за обраний період, шт;

$N_{НЦ}$ – номінальна кількість циклів вмк/вимк ДС (табл. 1), шт.

Таблиця 7

Тип ДС	Кількість ламп, які вийдуть з ладу за рік, шт										
	Тривалість володіння системою освітлення, років										
ЛР	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	86,00	70,00
ГЛ	34,00	36,00	34,00	36,00	34,00	36,00	34,00	36,00	34,00	36,00	36,00
КЛЛ	34,00	36,00	34,00	36,00	34,00	36,00	34,00	36,00	34,00	36,00	36,00
СДЛ	14,00	32,00	30,00	32,00	32,00	30,00	16,00	32,00	30,00	32,00	32,00

Вартість річного володіння системою штучного освітлення на базі датчиків руху ($C_{AL.MS}$) визначаємо за наступною формулою (11)

$$C_{ШО,ДР} = C_{П} + (C_{ДС} + C_3) \cdot N_{В,ДС} + P_{ДС} \cdot T_{ДС} \cdot C_{ЕЕ} + (C_{В} + W_{ДР} \cdot C_{ЕЕ}) \cdot N_{ДР}, \text{ грн.} \quad (11)$$

На рис. 10 представлено залежність вартості володіння системою штучного освітлення з керуванням за допомогою датчиків руху від тривалості її експлуатації.

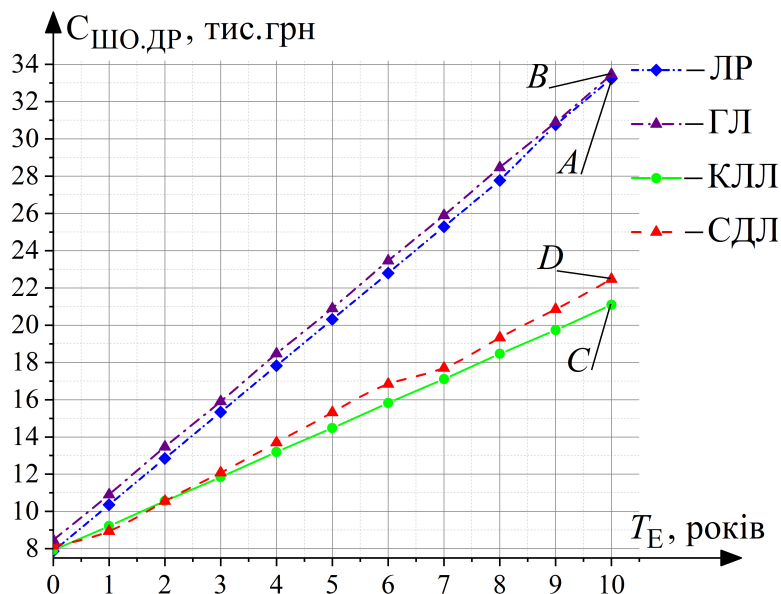


Рис. 10. Залежність вартості володіння системою штучного освітлення з датчиками руху ($C_{ШО,ДР}$, грн) від тривалості експлуатації (T_E , років) для ДС різного типу

Як видно з рис. 10, вартість володіння системою штучного освітлення з датчиками руху і ГЛ (33460 грн) (рис. 10, т. А) стає за 10 років експлуатації на 0,66% більшою, ніж з ЛР (33240 грн) (рис. 5.11, т. В), на 36,97% більше, ніж з КЛЛ (21090 грн) (рис. 5.11, т. С) і на 32,85% більшою, ніж з СДЛ (22469 грн) (рис. 10, т. D). Відповідно до отриманих даних вартість володіння системою керування датчиками руху з КЛЛ є на 6,13% економічно вигіднішим, а ніж з СДЛ.

3.4. Економічна ефективність заміни системи керування штучним освітленням

В даному підрозділі розглянемо економічний ефект від встановлення/заміни систем керування: 1) при встановленні астрономічного реле до системи штучного освітлення, в якій не було системи керування для різних ДС; 2) при встановленні датчиків руху до системи штучного освітлення, в якій не було системи керування для різних ДС; 3) при заміні астрономічного реле на датчики руху для різних ДС.

Дані щодо споживаної потужності, вартості систем керування, тривалості світіння ДС та кількості циклів вкл/викл за рік наведено в табл. 8.

Таблиця 8

Характеристики систем керування штучним освітленням з врахуванням вартості встановлення

Варіант	Тривалість світіння ДС, год/рік	Вартість системи керування, грн	ЕЕ спожита системою керування, кВт·год/рік	Кількість циклів вкл/викл за рік
Без системи керування (кожного ДС)	8 760	0	0	1
3 астрономічним реле (1 шт.) (кожного ДС)	4 313,77	32,45	11,388	365
3 датчиками руху (9 шт.) (усіх ДС)	1 196,94	225,36	35,478	144 210

Ефективність використання датчиків руху з астрономічним реле не розглядалось, оскільки, частка світлового дня в структурі доби протягом року для м. Тернопіль, становить 51% від загальної тривалості року (див. рис. 2). Якщо ж розглядати сумісну роботу датчиків руху з датчиками освітленості, то це також не принесе значної економії коштів через те, що вартість ЕЕ, спожитої ДС є незначною (173,44 грн для ГЛ, 40,47 грн для КЛЛ і 28,91 грн для СДЛ).

Економія коштів від використання системи керування з астрономічним реле ($E_{к,АР}$) визначалась за формулою (12)

$$E_{к,АР} = C_{ШО} - C_{ШО,АР}, \text{ грн.} \quad (12)$$

Економія коштів від використання системи керування з датчиками руху ($E_{к,ДР}$) визначалась за формулою (13)

$$E_{к,ДР} = C_{ШО} - C_{ШО,ДР}, \text{ грн.} \quad (13)$$

Результати розрахунку вартості володіння системами штучного освітлення з різними ДС наведено в табл. 9.

Таблиця 9

Вартість володіння системами штучного освітлення на базі ЛР, ГЛ, КЛЛ та СДЛ для наступних випадків: без пристроїв керування; з астрономічним реле; з датчиками руху для м. Тернопіль, Україна, тис. грн

Тип ДС	Тривалість експлуатації системи штучного освітлення, років										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Без системи керування											
ЛР	0,558	24,718	49,994	75,270	100,546	124,705	149,981	175,257	200,533	224,693	249,969
ГЛ	1,152	21,792	42,432	65,376	86,016	106,656	129,599	150,239	173,183	193,823	214,463
КЛЛ	0,612	4,502	8,391	12,281	16,170	20,060	23,949	27,839	31,729	35,618	39,508
СД	0,846	2,750	4,654	8,250	10,154	13,750	15,654	19,250	21,154	23,058	26,654
З астрономічним реле											
ЛР	1,608	13,600	25,593	37,585	50,693	62,685	74,678	87,786	99,778	111,771	124,879
ГЛ	2,202	12,463	22,724	32,985	43,246	53,507	63,769	76,334	86,595	96,856	107,117
КЛЛ	1,662	3,002	5,566	6,906	9,471	10,811	13,375	14,715	17,279	18,619	21,183
СД	1,896	2,861	3,826	4,791	5,756	8,413	9,379	10,344	11,309	12,274	14,931
З датчиками руху											
ЛР	7,875	10,362	12,849	15,336	17,823	20,310	22,797	25,284	27,770	30,753	33,240
ГЛ	8,469	10,904	13,467	15,902	18,465	20,901	23,464	25,899	28,462	30,897	33,460
КЛЛ	7,929	9,211	10,561	11,843	13,194	14,476	15,826	17,108	18,458	19,740	21,090

СД	8,163	8,936	10,554	12,079	13,697	15,316	16,841	17,707	19,326	20,850	22,469
----	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Для визначення термінів окупності систем штучного освітлення представлених в табл. 8 скористаємося цифровими даними цієї таблиці. Для визначення терміну окупності систем керування штучним освітленням від вартості володіння системою без керування штучним освітленням віднімаємо вартість володіння з системою керування. На рис. 11, терміни окупності систем керування штучним освітленням відповідають точки, в якій графіки перетинають вісь абсцис, яка проходить через нуль. Це обумовлено витратами на покупку та встановлення пристроїв керування. Точки перетину графіків рис. 11, вказують на термін після якого система штучного освітлення з датчиками руху забезпечить більшу сумарну економію коштів, а ніж при використанні астрономічного реле.

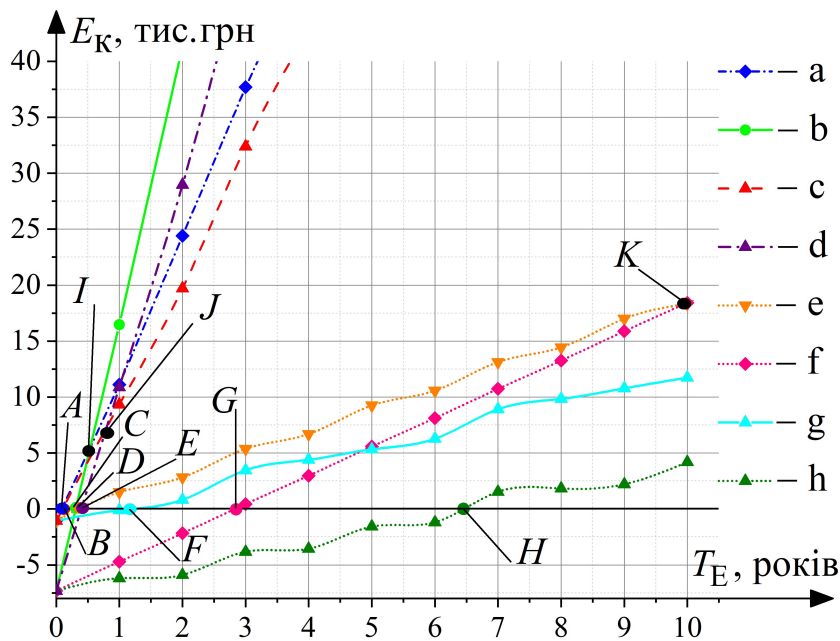


Рис. 11. Залежність економії коштів за рахунок використання систем керування освітленням сходових майданчиків багатоповерхових будинків за допомогою: а) ЛР; в) ГЛ; е) КЛЛ; г) СДЛ з астрономічним реле та б) ЛР; д) ГЛ; ф) КЛЛ; h) СДЛ з датчиками руху

На рис. 11 представлено графік залежності економії коштів за рахунок використання систем керування освітленням сходових та поверхових коридорів багатоповерхових будинків від терміну їх експлуатації при порівнянні з випадком без використання системи керування. На рис. 11 прийнято наступні позначення: а – витрати на встановлення та утримання системи штучного освітлення з ЛР, при використанні системи керування з астрономічним реле; б – витрати на встановлення та утримання системи керування штучним освітленням з ЛР, при використанні системи керування з датчиками руху; в – витрати на встановлення та утримання системи керування штучним освітленням з ГЛ, при використанні системи керування з астрономічним реле; д – витрати на встановлення та утримання системи керування штучним освітленням з ГЛ, при використанні системи керування з датчиками руху; е – витрати на встановлення та утримання системи керування штучним освітленням з КЛЛ, при використанні системи керування з астрономічним реле; ф – витрати на встановлення та утримання системи керування штучним освітленням з КЛЛ, при використанні системи керування з датчиками руху; г – витрати на встановлення та утримання системи керування штучним освітленням з СДЛ, при використанні системи керування з астрономічним реле; h – витрати на встановлення та утримання системи

керування штучним освітленням з СДЛ, при використанні системи керування з датчиками руху.

Як видно з рис. 11, термін окупності системи керування освітленням з астрономічним реле становить 0,09 року для ЛР (рис. 11, т. *A*), 0,10 року для ГЛ (рис. 11, т. *B*), 0,41 року для КЛЛ (рис. 11, т. *E*) і 1,12 року для СДЛ (рис. 11, т. *F*). Термін окупності при встановленні датчиків руху на всіх поверхах становить 0,31 року для ЛР (рис. 11, т. *C*), 0,40 року для ГЛ (рис. 11, т. *D*), 2,85 року для КЛЛ (рис. 11, т. *G*) і 4,85 року для СДЛ (рис. 11, т. *H*). Якщо порівнювати систему керування освітленням з датчиками руху з системою з астрономічним реле, то при використанні ЛР, то перша стає економічно вигіднішою через 0,54 року (рис. 11, т. *L*), в той час, як для ГЛ через 0,8 року (рис. 11, т. *J*) і через 9,92 року для КЛЛ (рис. 11, т. *H*), а для СДЛ кращим варіантом, з точки зору економічної ефективності є астрономічне реле. Як бачимо з отриманих результатів, за рахунок низького споживання електроенергії СДЛ використання системи керування як з датчиками руху, так і з астрономічним реле має великий термін окупності. В той же час для ЛР він не перевищує одного року в усіх випадках.

4. Обговорення

Доцільність проведеного дослідження зумовлена складністю оцінки переваг від встановлення системи керування штучним освітленням. Зазвичай здається достатнім замінити існуючі ДС на енергоефективні або довірити мешканцям вмикати/вимикати освітлення тоді, коли це необхідно. Результати наведені в статті дозволяють оцінити економічний та енергетичний ефект від використання енергоефективних ДС при впровадженні систем керування штучним освітленням. У випадку з астрономічним реле оцінюється ефективність використання природного освітлення обраного об'єкту.

Для визначення ефективності заходів з енергозбереження в багатоквартирних будинках, відділ житлового будівництва і відновлення громади штату Нью-Йорк профінансував дослідження з вивчення впливу на енергозбереження пристроїв керування штучним освітленням з урахуванням реальних режимів зайнятості в багатоквартирних будинках. Компанія Taitem Engineering, у 2012 році, в Ітаці, штат Нью-Йорк провела дослідження щодо інтенсивності руху мешканців [53]. Під час дослідження було здійснено моніторинг і реєстрацію інтенсивності руху мешканців у трьох багатоповерхових будинках (5, 6 і 15 поверхів) для визначення відвідуваності коридорів та сходових майданчиків. Один датчик був встановлений на сходовому майданчику середнього поверху, інший – біля ліфта. Датчики було встановлено на висоті 1,8 м над підлогою. Збір даних щодо інтенсивності руху мешканців будинку тривав безперервно чотири тижні. Тому результати досліджень не можуть бути використані для аналізу річного періоду.

Склад мешканців будь-якого конкретного будинку має власні унікальні професійні і демографічні особливості. Наприклад, в будівлі, яка заселена в основному мешканцями інтелектуальної праці, ймовірно, буде менше людей в коридорах або сходах з 9 до 17 години, з піками з 7 до 9 та з 17 до 19 годин. У молоді може бути ще один пік між 22:00 і 2:00, коли вони повертаються з зустрічей [53]. Варто зауважити, що розрахунки проведено для будинку з ліфтом.

Для розрахунку витрат ЕЕ на освітлення сходових майданчиків різних поверхів, в даному дослідженні прийнято, що переміщення мешканців на всіх поверхах відбувається ідентично, тобто по кожному поверсі мешканці з'являються однаково кількість раз. Також необхідно врахувати, що всі мешканці проходять через перший поверх, оскільки вхід в будинок розташований на ньому. Середня кількість мешканців в розглянутих випадках становила 71. Світильник на вході в під'їзд, в межах даного дослідження, не розглядався. Це обумовлено тим, що енергія, яку він споживає є сталою величиною незалежно від того, яка система керування освітленням використовується.

В результаті дослідження встановлено, що використання датчиків руху гарантує скорочення споживання електроенергії (до 97,92%). В той час, як тандем астрономічного реле з світлодіодними лампами дозволяє максимально скоротити витрати коштів на володіння системою штучного освітлення (до 50,05%). Суттєвий вплив на величину економічного ефекту має і вартість пристроїв керування освітлювальною установкою, та вплив режиму частих увімкнень на середню тривалість світіння ДС.

З популяризацією датчиків руху та СДЛ їх вартість знижуватиметься, строк служби зростатиме, що позитивно вплине на їх економічну ефективність. В будь-якому випадку термін окупності астрономічного реле менший, оскільки необхідно лише одне реле для керування системою освітлення, а датчиків руху – 9.

Слід зауважити, що економічна доцільність суміщеного освітлення (суміш природного із штучним) з ростом тарифів на ЕЕ також буде зростати. Оскільки ефективність використання астрономічного реле розрахована лише для конкретного регіону, то існує ймовірність, що в районах з більшою тривалістю світлового дня з точки зору економічних затрат астрономічне реле буде доцільнішим. В довготерміновій перспективі, за рахунок значного зниження витрат ЕЕ датчики руху стануть кращим варіантом. Крім економічної вигоди буде і екологічний ефект. Зі зменшенням споживання ЕЕ, зменшиться і потреба в її генерації, яка супроводжується викидами парникових газів на теплових електростанціях.

4. Висновки

В статті проведено експериментальні дослідження інтенсивності руху мешканців 9-ти поверхових будинків через дверний проріз першого поверху для тригодинних проміжків часу з 7:00 до 22:00 і 9-ти годинного інтервалу з 22:00 до 07:00 протягом року. Отримані дані дозволяють визначити енергетичну та економічну ефективність використання системи керування штучним освітленням за допомогою датчиків руху. В результаті дослідження встановлено, що використання на сходах та поверхових коридорах датчиків руху призводить до суттєвого зменшення споживання ЕЕ: при використанні ЛР – на 97,92%, ГЛ – на 97,73% КЛЛ – на 95,27%, СДЛ – 93,98%. в той час, як в залежності від енергоефективності джерел світла використання астрономічного реле призводить до зниження споживання ЕЕ на штучне освітлення на 49,41 – 50,58%.

З точки зору економічної ефективності ситуація дещо інша. За рахунок необхідності встановленні дев'яти датчиків руху економічний ефект від їх використання значно зменшиться. При встановленні астрономічного реле, вартість володіння системою освітлення з 10 років зменшується: з ЛР – на 50,04%, ГЛ – на 50,05% КЛЛ – на 46,38%, СДЛ – 43,98%, тоді як при використанні датчиків руху – з ЛР – на 86,70%, ГЛ – на 84,40% КЛЛ – на 46,62%, СДЛ – 15,70%.

З цього можна зробити висновок, що при реалізації на сходах і поверхових коридорах багатоповерхових будинків систем освітлення світлодіодними лампами з датчиками руху та СДЛ є реалізується найбільш енергоефективний варіант. Система суміщеного освітлення з астрономічним реле дозволяє максимально скоротити витрати коштів на її володіння. А системи керування з датчиками руху попри значне скорочення споживання ЕЕ має високий термін окупності навіть при умові використання таких енергоефективних ДС як КЛЛ та СДЛ.

References

- [1] ASHRAE. – Режим доступу: https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard_90.1-2013_I-P (accessed on 20 March 2020).
- [2] M. Halverson et al. ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2013 Determination of Energy Savings: Quantitative Analysis.
- [3] Architecture 2030. – Режим доступу: <https://architecture2030.org> (accessed on 20 March 2020).

- [4] EIA, U. S. Energy Information Administration. – Режим доступу: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=99&t=3> (accessed on 20 March 2020).
- [5] Lighting control requirements will drive building energy reduction (MAGAZINE) [Електронний ресурс] / M. Wright // USA. – 2014. – Режим доступу: <https://www.ledsmagazine.com/home/article/16700795/lighting-control-requirements-will-drive-building-energy-reduction-magazine>
- [6] Коваль В. П. Світлотехнічні аспекти заміни ламп розжарення на енергоефективні джерела світла / В. П. Коваль, М. Г. Тарасенко, Р. В. Коцюрко // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2014. – № 5. – С. 2-8. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/eesee_2014_5_2
- [7] Nadhim Majeed M. Impact of Building Typology on Daylight Optimization Using Building Information Modeling: Apartments in Erbil City as a Case Study / M. Nadhim Majeed, F. Ali Mustafa, H. Ali Husein // Journal of Daylighting. – 2019. – №6. – С. 187-201. <http://dx.doi.org/10.15627/jd.2019.17>
- [8] De Luca F. A novel solar envelope method based on solar ordinances for urban planning / F. De Luca, T. Dogan // Building Simulation. – 2019. – №12. – С. 817-834. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0561-1>
- [9] C. R. Lamb, City plan, The Craftsman 6 (1904) 3-13. – Режим доступу: <http://urbanplanning.library.cornell.edu/DOCS/lamb.htm>
- [10] Коваль В. П. Енергоефективне динамічне освітлення довгих коридорів / Вадим Коваль // Materials 6th International Scientific Conference "Lighting and power engineering: history, problems and perspectives", 30 січня – 02 лютого 2018 року. – Т. : ФОП Паляниця В.А., 2018. – С. 30–31. – Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/24278>
- [11] Sudan M., Tiwari G.N. Daylighting and energy performance of a building for composite climate: An experimental study // Alexandria Engineering Journal. – 2017. – Т. 55. – № 4. – С. 3091–3100. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.08.014>
- [12] Kristl Z., Krainer A. Light wells in residential building as a complementary daylight source // Solar Energy. – 1999. – Т. 65. – № 3. С. 197–206. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00127-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00127-3)
- [13] Analyzing occupancy profiles from a lighting controls field study [Електронний ресурс] / F. Rubinstein, N. Colak, J. Jennings, D. Neils // Conference: CIE Session 2003, San Diego, CA (US). – 2003. – Режим доступу: <https://www.osti.gov/biblio/813377>
- [14] Karpiński M. Energy efficiency regulation of the light source's luminous flux / M. Karpiński, K. Kozak // Pomiar Automatyka Robotyka. – 2013. – №11. – С. 79-83. – Режим доступу: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-fb3e2200-0af1-42be-87f0-cde56ce87232>
- [15] Almeida et al, Solid state lighting review – Potential and challenges in Europe, Renewable and Sustainable Energy Reviews 34 (2014) 30-48. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.029>
- [16] Bellia L. Why are daylight-linked controls (DLCs) not so spread? A literature review / L. Bellia, F. Fragliasso, E. Stefanizzi // Building and Environment – 2016. – №106. – С. 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.040>
- [17] Dogan T. A new framework for residential daylight performance evaluation / T. Dogan, Y. C. Park // In: Proceedings of the International IBPSA Building Simulation Conference, San Francisco, USA. – 2017. – С. 170-178.
- [18] Dogan T. A critical review of daylighting metrics for residential architecture and a new metric for cold and temperate climates / T. Dogan, Y. C. Park // Lighting Research & Technology. – 2018. – №51. – С. 206-230. <https://doi.org/10.1177/1477153518755561>
- [19] Doulos L. Multi-criteria decision analysis to select the optimum position and proper field of view of a photosensor / L. Doulos, A. Tsangrassoulis, F. V. Topalis // Energy Conversion and Management. – 2014. – №86. – С. 1069-1077. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.032>
- [20] Lo Verso V. R. M. Energy Saving Generated Through Automatic Lighting Control Systems According to the Estimation Method of the Standard EN 15193-1 / V. R. M. Lo Verso // Journal of Daylighting. – 2019. – №6. – С. 131-147. <http://dx.doi.org/10.15627/jd.2019.13>
- [21] Doulos L. T. Minimizing energy consumption for artificial lighting in a typical classroom of a Hellenic public school aiming for near Zero Energy Building using LED DC luminaires and daylight harvesting systems / L.T. Doulos, A. Kontadakis, E.N. Madias, M. Sinou, A. Tsangrassoulis // Energy and Buildings. – 2019. – №194. – С. 201-217. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.033>
- [22] Obradovic B. Daylight Transport Systems for Buildings at High Latitudes // B. Obradovic, B. S. Matusiak // Journal of Daylighting. – 2019. – №6. – С. 60-79. <http://dx.doi.org/10.15627/jd.2019.8>
- [23] Garg V. Smart occupancy sensors to reduce energy consumption / V. Garg, N. K. Bansal // Energy and Buildings. – 2000. – № 32. – С. 81–87. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00040-7)
- [24] Menezes A. C. Analysis of electricity consumption for lighting and small power in office buildings / A. C. Menezes, A. Cripps, D. Bouchlaghem, R. Buswell // CIBSE Technical Symposium, DeMontfort University, Leicester, UK, 6 - 7 September. – 2011. Available: https://repository.lboro.ac.uk/articles/Analysis_of_electricity_consumption_for_lighting_and_small_power_in_office_buildings/9424484

- [25] Becker V. Exploring zero-training algorithms for occupancy detection based on smart meter measurements / V. Becker, W. Kleiminger // *Computer Science - Research and Development*. – 2018. – Т. 33. – №1-2. – С. 25-36. <https://doi.org/10.1007/s00450-017-0344-9>
- [26] Delaney D. T. Evaluation of energy-efficiency in lighting systems using sensor networks / D. T. Delaney, G. M. P. O'Hare, A. G. Ruzzelli // *Conference: BuildSys First ACM Workshop On Embedded Sensing Systems For Energy-Efficiency In Buildings*. –2009. <https://doi.org/10.1145/1810279.1810293>
- [27] Дзядикевич, Ю. Споживання електроенергії в житлово-комунальній сфері / Ю. Дзядикевич, Б. Гевко, Ю. Никеруй // *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. – 2011. – N 1. - С. 20-23. – Режим доступу : URL : <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/21212>
- [28] Дзядикевич, Ю. Шляхи економії електроенергії загального користування в сфері ЖКГ / Ю. Дзядикевич, Б. Гевко, Ю. Никеруй // *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. – 2011. – N 6. - С. 21-24. – Режим доступу : URL : <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/21819>
- [29] Nguyen T. A. Energy intelligent buildings based on user activity: A survey / Tuan Anh Nguyen, Marco Aiello // *Energy and Buildings*. – 2013. – №56. – С. 244-257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.005>
- [30] Guo X. The performance of occupancy-based lighting control systems: A review / X. Guo, D. K. Tiller, G. P. Henze, C. E. Waters // *Lighting Research & Technology*. – 2010. – №42. – С. 415-431. <https://doi.org/10.1177/1477153510376225>
- [31] Dubois M-C. Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review / M-C. Dubois, A. Blomsterberg // *Energy and Buildings*. – 2011. – Т. 43. – №10. – С. 2572-2582. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.001>
- [32] Dubois M-C. Retrofitting the Electric Lighting and Daylighting Systems to Reduce Energy Use in Buildings: A Literature Review / M-C. Dubois, F. Bisegna, N. Gentile, M. Knoop, B. Matusiak, W. Osterhaus, E. Tetri // *Energy Research Journal*. –2015. – Т. 6. – № 1. – С. 25-41. <https://doi.org/10.3844/erjsp.2015.25.41>
- [33] Haq Mohammad A. A review on lighting control technologies in commercial buildings, their performance and affecting factors / A. Haq Mohammad, M. Yusri Hassan, H. Abdullah, H. Abdul Rahman, M. Pauzi Abdullah, F. Hussin, D. Mat Said // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Т. 33. – №2. – С. 268-279. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.090>
- [34] Bellia L. Daylit offices: a comparison between measured parameters assessing light quality and users' opinions / L. Bellia, F. Fragliasso, E. Stefanizzi // *Building and Environment*. – 2017. – №113. – С. 92-106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.014>
- [35] Nagy Z. Occupant centered lighting control: A user study on balancing comfort, acceptance, and energy consumption / Z. Nagy, F. Y. Yong, A. Schlueter // *Energy and Buildings*. – 2016. – №126. – С. 310-322. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.075>
- [36] Бурмака, В. Визначення зведеного індексу засклення приміщення / Vitalii Burmaka, Mykola Tarasenko, Kateryna Kozak, Viktor Khomyshyn // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2018. – Т. 4, N 10 (94). – С. 22-28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141018>
- [37] Бурмака В. Вплив орієнтації світлопрозорої зовнішньої огорожувальної конструкції на енергетичний баланс приміщення / Віталій Бурмака, Микола Тарасенко, Катерина Козак, Віктор Хомишин // *Вісник ТНТУ*. – Т. : ТНТУ. – 2019. – Том 94. – № 2. – С. 111–122. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2019.02.111
- [38] Державні будівельні норми України. – Режим доступу: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_v_2_5_28/1-1-0-1188 (accessed on 20 March 2020).
- [39] ELMIR. – Режим доступу: https://elmir.ua/lamps/lamp_osram_classic_a_fr_40w_e27_4008321419415_10032158.html (accessed on 20 March 2020).
- [40] Законодавство України. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/264-2019-п> (accessed on 20 March 2020).
- [41] Elektrolight. – Режим доступу: <https://www.elektrolight.ru/lampy/galogennye-v-kolbe/lampa-galogennaya-64542-p-eco-30w-e27-osram-4008321998286> (accessed on 20 March 2020).
- [42] IEC 60357:2002 – Tungsten halogen lamps (non vehicle) - Performance specifications
- [43] ElectroMarket. – Режим доступу: <https://electro-market.com.ua/ctproduct/ljyminescentnaya-lampa-fs-7-4200-27-7w-4200k-e27-spiral-220v-evrosvet.html> (accessed on 20 March 2020).
- [44] IEC 60969 – Self-ballasted compact fluorescent lamps for general lighting services - performance requirements
- [45] Maxus International Corporation. – Режим доступу: <https://maxus.com.ua/led-lampa-global-g45-f-5w-teplyj-svet-e14-1-gbl-143.html> (accessed on 20 March 2020).
- [46] IEC 62612:2013+AMD1:2015+AMD2:2018 – CSV Consolidated version Self-ballasted LED lamps for general lighting services with supply voltages > 50 V – Performance requirements
- [47] Domovii. Customer Service. – Режим доступу: <https://domoviy.com/elektrik/cini-na-elektromontazni-roboti-ternopil&l=ua> (accessed on 20 March 2020).
- [48] 365.wiki. – Режим доступу: <https://365.wiki> (accessed on 20 March 2020).

- [49] Novatek Electro. – Режим доступу: <https://novatek-electro.com/en/products/programmable-timers-with-photo-relay-and-voltage-monitor/astronomical-timer-for-street-lighting-rev-225.html> (accessed on 20 March 2020).
- [50] Пальчевський Б.О. Дослідження технологічних систем (моделювання, проектування, оптимізація): Навч. посібник // Львів.: Світ. – 2001. – 232 с.
- [51] F&F domestic and industrial automation. – Режим доступу: <https://www.fif.com.pl/en/motion-sensor-switch/509-infrared-motion-sensor-dr-08.html> (accessed on 20 March 2020).
- [52] АКСИОМПЛЮС. – Режим доступу: <https://axiomplus.com.ua/datchiki-dvizheniya/product-69508/> (accessed on 20 March 2020).
- [53] Rubin C., Ruscitti T, Shapiro I. Boosting multifamily energy savings through lighting control settings // Home Energy. – 2013. – № 5. – С. 38–42. – Режим доступу: <http://www.homeenergy.org/show/article/id/1904>
- [54] Jump C. Welcome to the Dark Side: The Effect of Switching on CFL Measure Life / C. Jump, J. J.Hirsch, J.S. Peters, D. Moran // ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Vol. 2, American Council for an Energy Efficient Economy, Pacific Grove, California. – 2008. – Т. 2. – № 138-149.
- [55] Бурмака В. Підвищення енергоефективності використання суміщеного освітлення для сходових кліток / Віталій Бурмака, Микола Тарасенко // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій“ присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. – Т. : ФОП Паляниця В. А. – 2019. – С. 273-277. – Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28856>

References

- [1] ASHRAE. Available online: https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard_90.1-2013_I-P (accessed on 20 March 2020).
- [2] M. Halverson et al. ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2013 Determination of Energy Savings: Quantitative Analysis. <https://doi.org/10.2172/1159790>
- [3] Architecture 2030. Available online: <https://architecture2030.org> (accessed on 20 March 2020).
- [4] EIA, U. S. Energy Information Administration, Accessed on 20 March 2020, Available online: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=99&t=3>
- [5] M. Wright. Lighting control requirements will drive building energy reduction (Magazine). 2014. (Accessed 26 August 2019). Available: <https://www.ledsmagazine.com/home/article/16700795/lighting-control-requirements-will-drive-building-energy-reduction-magazine>
- [6] V. Koval, M. Tarasenko, R. Kotsyurko. Svitlotekhnichni aspekty zaminy lamp rozzharenniya na enerhoefektyvni dzherela svitla. Energy saving. Power engineering. Energy audit. 5 (2014) 2–8. (Accessed 26 August 2019). Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecee_2014_5_2
- [7] M. Nadhim Majeed, F. Ali Mustafa, H. Ali Husein, Impact of Building Typology on Daylight Optimization Using Building Information Modeling: Apartments in Erbil City as a Case Study, Journal of Daylighting 6 (2019) 187-201. <http://dx.doi.org/10.15627/jd.2019.17>
- [8] F. De Luca, T. Dogan, A novel solar envelope method based on solar ordinances for urban planning, Building Simulation 12 (2019) 817-834. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0561-1>
- [9] C. R. Lamb, City plan, The Craftsman 6 (1904) 3-13, Available: <http://urbanplanning.library.cornell.edu/DOCS/lamb.htm>
- [10] V. Koval, Energy efficient dynamic lighting of long-term corridors, Materials 6th International Scientific Conference "Lighting and power engineering: history, problems and perspectives" (Ternopil, January 30 – February 02, 2018) (2018) 30-31, Available: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/24278>.
- [11] M. Sudan, G. N. Tiwari, Daylighting and energy performance of a building for composite climate: An experimental study, Alexandria Engineering Journal 55(4) (2016) 3091-3100. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.08.014>
- [12] Z. Kristl, A. Krainer, Light wells in residential building as a complementary daylight source, Solar Energy 65 (1999) 197-206. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00127-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00127-3)
- [13] F. Rubinstein, N. Colak, J. Jennings, D. Neils, Analyzing occupancy profiles from a lighting controls field study, Conference: CIE Session 2003, San Diego, CA (US), Available: <https://www.osti.gov/biblio/813377>
- [14] M. Karpiński, K. Kozak, Energy efficiency regulation of the light source’s luminous flux, Pomiar Automatyka Robotyka 11 (2013) 79-83, Available: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-fb3e2200-0af1-42be-87f0-cde56ce87232>
- [15] Almeida et al, Solid state lighting review – Potential and challenges in Europe, Renewable and Sustainable Energy Reviews 34 (2014) 30-48. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.029>
- [16] L. Bellia, F. Fragliasso, E. Stefanizzi, Why are daylight-linked controls (DLCs) not so spread? A literature review, Building and Environment 106 (2016) 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.040>
- [17] T. Dogan, Y. C. Park, A new framework for residential daylight performance evaluation, In: Proceedings of the International IBPSA Building Simulation Conference, San Francisco, USA (2017) 170-178.

- [18] T. Dogan, Y. C. Park, A critical review of daylighting metrics for residential architecture and a new metric for cold and temperate climates, *Lighting Research & Technology* 51 (2018) 206-230. <https://doi.org/10.1177/1477153518755561>
- [19] L. Doulos, A. Tsangrassoulis, F. V. Topalis, Multi-criteria decision analysis to select the optimum position and proper field of view of a photosensor, *Energy Conversion and Management* 86 (2014) 1069-1077. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.032>
- [20] Valerio R.M. Lo Verso, Anna Pellegrino, Energy Saving Generated Through Automatic Lighting Control Systems According to the Estimation Method of the Standard EN 15193-1, *Journal of Daylighting* 6 (2019) 131-147. <http://dx.doi.org/10.15627/jd.2019.13>
- [21] L.T. Doulos, A. Kontadakis, E.N. Madias, M. Sinou, A. Tsangrassoulis, Minimizing energy consumption for artificial lighting in a typical classroom of a Hellenic public school aiming for near Zero Energy Building using LED DC luminaires and daylight harvesting systems, *Energy and Buildings* 194 (2019) 201-217. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.033>
- [22] B. Obradovic, B. Szybinska Matusiak, Daylight Transport Systems for Buildings at High Latitudes. *Journal of Daylighting* 6 (2019) 60-79. <http://dx.doi.org/10.15627/jd.2019.8>
- [23] V. Garg, N. K. Bansal, Smart occupancy sensors to reduce energy consumption, *Energy and Buildings* 32 (2000) 81-87. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00040-7)
- [24] A. C. Menezes, A. Cripps, D. Bouchlaghem, R. Buswell, Analysis of electricity consumption for lighting and small power in office buildings, CIBSE Technical Symposium, DeMontfort University, Leicester, UK, 6 - 7 September, 2011, Available: https://repository.lboro.ac.uk/articles/Analysis_of_electricity_consumption_for_lighting_and_small_power_in_office_buildings/9424484
- [25] V. Becker, W. Kleiminger, Exploring zero-training algorithms for occupancy detection based on smart meter measurements, *Computer Science - Research and Development* 33 (1-2) (2018) 25-36. <https://doi.org/10.1007/s00450-017-0344-9>
- [26] D. T. Delaney, G. M. P. O'Hare, A. G. Ruzzelli, Evaluation of energy-efficiency in lighting systems using sensor networks, Conference: BuildSys First ACM Workshop On Embedded Sensing Systems For Energy-Efficiency In Buildings (2009). <https://doi.org/10.1145/1810279.1810293>
- [27] Yu. V. Dzyadykevych, B. R. Hewko, Yu. S. Nykeruy, Current consumption in a housing and municipal ORB. Energy saving. Power engineering, Energy audit 83(1) (2011) 20-23, Available: <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/21212>
- [28] Yu. V. Dzyadykevych, B. R. Hewko, Yu. S. Nykeruy, Ways to save power in public housing, Energy saving. Power engineering, Energy audit 88(6) (2011) 21-24, Available: <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/21819>
- [29] Tuan Anh Nguyen, Marco Aiello, Energy intelligent buildings based on user activity: A survey, *Energy and Buildings*, 56 (2013) 244-257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.005>
- [30] X. Guo, D. K. Tiller, G. P. Henze, C. E. Waters, The performance of occupancy-based lighting control systems: A review, *Lighting Research & Technology* 42 (2010) 415-431. <https://doi.org/10.1177/1477153510376225>
- [31] M-C. Dubois, A. Blomsterberg, Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review, *Energy and Buildings* 10(43) (2011) 2572-2582. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.001>
- [32] M-C. Dubois, F. Bisegna, N. Gentile, M. Knoop, B. Matusiak, W. Osterhaus and E. Tetri, Retrofitting the Electric Lighting and Daylighting Systems to Reduce Energy Use in Buildings: A Literature Review, *Energy Research Journal* 1(6) (2015) 25-41. <https://doi.org/10.3844/erjsp.2015.25.41>
- [33] A. Haq Mohammad, M. Yusri Hassan, H. Abdullah, H. Abdul Rahman, M. Pauzi Abdullah, F. Hussin, D. Mat Said, A review on lighting control technologies in commercial buildings, their performance and affecting factors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33 (2) (2014) 268-279. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.090>
- [34] L. Bellia, F. Fragliasso, E. Stefanizzi, Daylit offices: a comparison between measured parameters assessing light quality and users' opinions, *Building and Environment* 113 (2017) 92-106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.014>
- [35] Z. Nagy, F. Y. Yong, A. Schlueter, Occupant centered lighting control: A user study on balancing comfort, acceptance, and energy consumption, *Energy and Buildings* 126 (2016) 310-322. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.075>
- [36] V. Burmaka, M. Tarasenko, K. Kozak, V. Khomyshyn, Definition of a composite index of glazing rooms, *Eastern-European journal of enterprise technologies* 4 (10) (2018) 22-28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141018>
- [37] M. Tarasenko, V. Burmaka, K. Kozak, V. Khomyshyn, Impact of the translucent structures of exterior wall envelope orientation on the energy balance of the premises, *Scientific Journal of TNTU (Tern.)* 94(2) (2019) 92-103. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2019.02.111
- [38] State building codes of Ukraine. Available online: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_v_2_5_28/1-1-0-1188 (accessed on 20 March 2020).

- [39] ELMIR. Available online: https://elmir.ua/lamps/lamp_osram_classic_a_fr_40w_e27_4008321419415_10032158.html (accessed on 20 March 2020).
- [40] Legislation of Ukraine. Available online: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/264-2019-п> (accessed on 20 March 2020).
- [41] Elektrolight. Available online: <https://www.elektrolight.ru/lampy/galogennye-v-kolbe/lampa-galogennaya-64542-p-eco-30w-e27-osram-4008321998286> (accessed on 20 March 2020).
- [42] IEC 60357:2002 – Tungsten halogen lamps (non vehicle) - Performance specifications.
- [43] ElectroMarket. Available online: <https://electro-market.com.ua/ctproduct/ljyminescentnaya-lampa-fs-7-4200-27-7w-4200k-e27-spiral-220v-evrosvet.html> (accessed on 20 March 2020).
- [44] IEC 60969 – Self-ballasted compact fluorescent lamps for general lighting services - performance requirements. <https://doi.org/10.3403/30273416>
- [45] Maxus International Corporation. Available online: <https://maxus.com.ua/led-lampa-global-g45-f-5w-teplyj-svet-e14-1-gbl-143.html> (accessed on 20 March 2020).
- [46] IEC 62612:2013+AMD1:2015+AMD2:2018 – CSV Consolidated version Self-ballasted LED lamps for general lighting services with supply voltages > 50 V – Performance requirements. <https://doi.org/10.3403/30204073u>
- [47] Domovii. Customer Service. Available online: <https://domoviy.com/elektrik/cini-na-elektromontazni-roboti-ternopil&l=ua> (accessed on 20 March 2020).
- [48] 365.wiki. Available online: <https://365.wiki> (accessed on 20 March 2020).
- [49] Novatek Electro. Available online: <https://novatek-electro.com/en/products/programmable-timers-with-photo-relay-and-voltage-monitor/astronomical-timer-for-street-lighting-rev-225.html> (accessed on 20 March 2020).
- [50] B.O. Palchevskyi. Research of technological systems (modeling, designing, optimization), Svit, Lviv, 2001, pp. 232.
- [51] F&F domestic and industrial automation. Available online: <https://www.fif.com.pl/en/motion-sensor-switch/509-infrared-motion-sensor-dr-08.html> (accessed on 20 March 2020).
- [52] Motion sensor F&F DR-08, Available: <https://axiomplus.com.ua/datchiki-dvizheniya/product-69508/> (accessed on 20 March 2020).
- [53] C. Rubin, T. Ruscitti, I. Shapiro, Boosting multifamily energy savings through lighting control settings, Home Energy 129(3), (2013) 38-42. Available: <http://www.homeenergy.org/show/article/id/1904>.
- [54] C. Jump, J. J.Hirsch, J.S. Peters, D. Moran, Welcome to the Dark Side: The Effect of Switching on CFL Measure Life, in: ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Vol. 2, American Council for an Energy Efficient Economy, Pacific Grove, California 2 (2008) 138-149.
- [55] V. Burmaka, M. Tarasenko, Energy efficiency using of combined indoor lighting for stair cells, Materialy IV Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Teoretychni ta prykladni aspekty radiotekhniki, pryladobuduvannia i komp'uternykh tekhnolohii" prysviachena 80-ty richchiu z dnia narodzhennia profesora Ya.I. Protsia (Tern., 20-21 June 2019) (2019) 273-277. Available: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28856>