

О. М. ДОВГАЛЮК, Р. В. БОНДАРЕНКО, І. С. ЯКОВЕНКО

РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОНОМНИХ ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ШЛЯХІВ УКРАЇНИ

Зменшення рівня небезпеки на автомобільних шляхах за допомогою створення сучасних систем освітлення – це одне з важливих практичних завдань, яке на сьогоднішній день має певні проблеми. Стрімкий розвиток відновлюваної енергетики дозволяє використовувати готові рішення для створення автономних освітлювальних комплексів для нерегульованих пішохідних переходів. Виконано аналіз особливостей проектування, конструктивного виконання та експлуатації автономних освітлювальних комплексів, що розташовані на території Харківської області та які для живлення освітлювальних приладів та миготливих сигнальних світлофорів використовують відновлювальні джерела і системи накопичення енергії. Результати аналізу довели, що досліджувані освітлювальні комплекси не здатні самі себе забезпечити енергією в потрібному обсязі і нормально функціонувати при низькому рівні інсоляції і низькій температурі навколишнього середовища. Виявлені причини нестабільної роботи автономних освітлювальних комплексів, серед яких основною є недостатня точність урахування фактичних кліматичних умов експлуатації об'єктів при формуванні проектних рішень. Розроблені заходи для підвищення ефективності функціонування досліджуваних автономних освітлювальних комплексів, які передбачають застосування готових технічних рішень на основі сучасних засобів і технологій. Запропоновано критерій достатності застосування розроблених заходів для вирішення задачі забезпечення автономного живлення освітлювальних комплексів для автошляхів, в якості якого прийнято знак результуючої потужності комплексу за розрахунковий період часу. Практичне використання розробленого критерію підтвердило доцільність застосування запропонованих заходів щодо підвищення ефективності експлуатації досліджуваних автономних освітлювальних комплексів для автомобільних шляхів. Виконані розрахунки довели недостатність використання тільки сонячних панелей для живлення освітлювальних комплексів автошляхів, розташованих в регіонах з нестабільним рівнем інсоляції. Кількісно підтверджено доцільність застосування гібридних систем живлення автономних освітлювальних комплексів, в яких, крім сонячних панелей, використовуються такі додаткові джерела живлення як вітрогенератори та системи з електромеханічними перетворювачами.

Ключові слова: відновлюване джерело енергії, автономний освітлювальний комплекс, сонячна панель, вітрогенератор, електромеханічний перетворювач, інсоляція, потужність, термін автономної роботи, критерій достатності, ефективність функціонування.

О. Н. ДОВГАЛЮК, Р. В. БОНДАРЕНКО, И. С. ЯКОВЕНКО

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОНОМНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ УКРАИНЫ

Снижение уровня опасности на автомобильных дорогах с помощью создания современных систем освещения – это одна из важных практических задач, которая на сегодняшний день имеет определенные проблемы. Стремительное развитие возобновляемой энергетики позволяет использовать готовые решения для создания автономных осветительных комплексов для нерегулируемых пешеходных переходов. Выполнен анализ особенностей проектирования, конструктивного исполнения и эксплуатации автономных осветительных комплексов, которые расположены на территории Харьковской области и для питания осветительных приборов и мигающих сигнальных светофоров используют возобновляемые источники и системы накопления энергии. Результаты анализа показали, что исследуемые осветительные комплексы не способны сами себя обеспечить энергией в нужном объеме и нормально функционировать при низком уровне инсоляции и низкой температуре окружающей среды. Выявлены причины нестабильной работы автономных осветительных комплексов, среди которых основной является недостаточная точность учета фактических климатических условий эксплуатации объектов при формировании проектных решений. Разработаны мероприятия для повышения эффективности функционирования исследуемых автономных осветительных комплексов, предусматривающие применение готовых технических решений на основе современных средств и технологий. Предложен критерий достаточности применения разработанных мероприятий для решения задачи обеспечения автономного питания осветительных комплексов для автодорог, в качестве которого принят знак результирующей мощности комплекса за расчетный период времени. Практическое использование разработанного критерия подтвердило целесообразность применения предложенных мероприятий по повышению эффективности эксплуатации исследуемых автономных осветительных комплексов для автомобильных дорог. Выполненные расчеты показали недостаточность использования только солнечных панелей для питания осветительных комплексов автодорог, расположенных в регионах с нестабильным уровнем инсоляции. Количественно подтверждена целесообразность применения гибридных систем питания автономных осветительных комплексов, в которых, кроме солнечных панелей, используются такие дополнительные источники питания как ветрогенераторы и системы с электромеханическими преобразователями.

Ключевые слова: возобновляемый источник энергии, автономный осветительный комплекс, солнечная панель, ветрогенератор, электромеханический преобразователь, инсоляция, мощность, срок автономной работы, критерий достаточности, эффективность функционирования.

О. М. DOVGALYUK, R. V. BONDARENKO, I. S. YAKOVENKO

DEVELOPMENT OF MEASURES TO IMPROVE THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF AUTONOMOUS LIGHTING COMPLEXES FOR UKRAINIAN HIGHWAYS

Reducing highway hazards through the creation of modern lighting systems is an important practical task that currently has some difficulties. The rapid development of renewable energy makes it possible to use off-the-shelf solutions to create autonomous lighting complexes for unregulated pedestrian crossings. The analysis of peculiarities of design, constructive structure and operation of autonomous lighting complexes, which are located in Kharkiv region and use renewable energy sources and energy storage systems to power lighting devices and flashing signal lights, is carried out. The analysis results showed that the lighting complexes under investigation are not capable of supplying sufficient energy for themselves and of functioning properly at low insolation and low ambient temperatures. The reasons for the unstable operation of autonomous lighting complexes have been identified, with the

© О. М. Довгалюк, Р. В. Бондаренко, І. С. Яковенко, 2020

main one being the insufficient accuracy of taking into account the actual climatic operating conditions of facilities when forming design solutions. Measures have been developed to improve the efficiency of the autonomous lighting complexes under study, involving the use of off-the-shelf technical solutions based on modern tools and technologies. A criterion for sufficiency of the developed measures to solve the problem of autonomous power supply of lighting complexes for highways is proposed. The sign of the resulting capacity of the complex over the calculation time period is taken as a sufficiency criterion. The practical use of the developed criterion confirmed the feasibility of the proposed measures to improve the operational efficiency of the investigated autonomous lighting complexes for highways. Calculations have shown that it is not sufficient to use solar panels alone to supply highway lighting complexes located in regions with unstable levels of insolation. The feasibility of hybrid power supply systems for autonomous lighting complexes that use additional power sources such as wind turbines and systems with electromechanical converters in addition to solar panels has been quantitatively confirmed.

Keywords: renewable energy source, autonomous lighting complex, solar panel, wind generator, electromechanical converter, insolation, power, autonomous operation period, sufficiency criterion, efficiency of operation.

Постановка проблеми. Стійкою тенденцією розвитку енергетики на сьогоднішній день є активне використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), які широко застосовуються як у складі електроенергетичних систем, так і побутовими споживачами. Одним з перспективних напрямків застосування автономних ВДЕ є живлення електричних установок невеликої потужності, для яких відсутня можливість підключення до централізованих мереж енергопостачальної організації або вартість підключення яких є дуже високою через складність в узгодженні документації, отриманні дозволів тощо. Яскравим прикладом таких споживачів є автономні освітлювальні комплекси (АОК), встановлені на нерегульованих пішохідних переходах автомобільних шляхів.

Освітлення нерегульованих пішохідних переходів має дуже важливе значення для створення безпечних умов на дорогах. Дослідження показують, що 32 % дорожньо-транспортних пригод (ДТП) з наїздом на пішохода виникає в денний час, а 68 % в нічний [1]. У багатьох країнах світу питанню застосування АОК для нерегульованих пішохідних переходів приділяється багато уваги при проектуванні, реалізації та експлуатації. Статистика показує, що встановлення освітлювальних приладів на пішохідних переходах різко зменшує кількість ДТП і суттєво підвищує безпеку як пішоходів, так і водіїв.

Згідно [2] всі пішохідні переходи повинні бути освітлені відповідно до встановлених нормативів. Однак перед проектними та будівельними організаціями часто постає питання приєднання до електричних мереж освітлювального обладнання пішохідного переходу в умовах значної віддаленості об'єкта від джерела живлення. Оскільки варіант будівництва кабельної або повітряної лінії для підключення декількох світлодіодних світильників є дуже дорогим, то проекти з використанням сонячних панелей для живлення таких навантажень активно розробляються і реалізуються як у світі, так і в Україні. Сонячні панелі встановлюються на опорах освітлення і протягом дня заряджають акумулятори, а в темний час доби акумулятори живлять світильник і миготливий сигнальний світлофор.

У 2019 році на дорогах України було встановлено кілька сотень таких об'єктів, але згодом було виявлено, що вони працюють нестабільно. В осінні та зимові місяці, що характеризуються мінімальною інсоляцією, освітлення пішохідних переходів не працювало взагалі або працювало не на повну потужність.

Таким чином, питання підвищення ефективності експлуатації АОК для автомобільних шляхів України є досить актуальним і своєчасним.

Аналіз публікацій. Багато вчених у світі займалася питаннями використання ВДЕ для освітлення автошляхів. Так, увага приділялась аналізу різних типів ВДЕ для електропостачання систем освітлення вулиць [3], в результаті чого доведено, що саме сонячні панелі є найбільш економічними у порівнянні з вітроустановками, дизель-генераторами та іншими джерелами автономного живлення.

Досліджувалась можливість забезпечення автономного освітлення різних одиниць міської інфраструктури від ВДЕ, проводився аналіз їх особливостей роботи та переваг [4], завдяки чому були визначені шляхи для зменшення втрат електричної енергії в досліджуваних електричних мережах.

Багато наукових робіт присвячено питанням дослідження надійності та ефективності систем вуличного освітлення, що використовують в якості джерела живлення ВДЕ [5], особливостям застосування інтелектуальних систем управління для вуличного освітлення з інтегрованими ресурсами сонячної енергії [6], використанню «розумних систем» для вирішення завдань енергозбереження при роботі вуличного освітлення з ВДЕ [7], а також створенню систем сонячного світлодіодного інтелектуального освітлення, заснованого на інтернеті речей і використанні суперконденсаторів [8].

Слід зазначити, що незважаючи на активне впровадження в експлуатацію АОК питання аналізу недоліків роботи таких установок висвітлені недостатньо. З цієї причини дане дослідження дало б можливість визначити основні шляхи усунення виявлених недоліків та підвищити ефективність роботи досліджуваних освітлювальних комплексів.

Мета статті. Метою проведеного дослідження є виявлення та аналіз проблем функціонування АОК для автомобільних шляхів України та розробка заходів щодо підвищення ефективності їх експлуатації.

Аналіз функціонування АОК для автомобільних шляхів України. Для визначення причин нестабільної роботи АОК були проаналізовані особливості проектування, монтажу та експлуатації таких об'єктів для автошляхів України. З цією метою відповідно до інформації щодо проектних рішень про комплекти обладнання для АОК, представленої в [9], та рівнів інсоляції в регіоні були визначені терміни автономної роботи досліджуваних установок відповідно до виразу:

$$t_{\text{АОК}_p} = \frac{U_{\text{АК}} \cdot C_{\text{АК}} \cdot N \cdot K_{\text{П}} \cdot K_{\text{ГР}} \cdot K_{\text{ДС}}}{P_{\text{Н}}}, \quad (1)$$

де $t_{\text{АОК}_p}$ – розрахунковий час роботи АОК;
 $U_{\text{АК}}$ – напруга однієї акумуляторної батареї;
 $C_{\text{АК}}$ – ємність акумулятора;
 N – кількість акумуляторних батарей;
 $K_{\text{П}}$ – ККД перетворювача;
 $K_{\text{ГР}}$ – коефіцієнт глибини розряду;
 $K_{\text{ДС}}$ – коефіцієнт доступної ємності, який залежить від режиму розряду і температури;
 $P_{\text{Н}}$ – потужність навантаження.

За умови правильного вибору обладнання освітлювальний комплекс повинен забезпечити автономну роботу установки без підзарядки не менше трьох діб відповідно до нормативних документів. При цьому середня тривалість роботи АОК на добу протягом зазначеного періоду визначається за виразом:

$$t_{\text{АОК}_{\text{доб}}} = \frac{t_{\text{АОК}_p}}{N_{\text{доб}}}, \quad (2)$$

де $t_{\text{АОК}_{\text{доб}}}$ – середня тривалість роботи АОК за добу;
 $N_{\text{доб}}$ – нормована кількість діб автономної роботи освітлювального комплексу без підзарядки, яка згідно [10] становить $N_{\text{доб}} = 3$ доби.

Для забезпечення необхідних умов безпеки на автомобільних дорогах в Харківській області відповідно до технічних вимог і діючих нормативів з освітленості було встановлено по одному АОК з кожного боку пішохідного переходу. Освітлення було забезпечено з використанням світильників потужністю 29 Вт зі світловим потоком 3200 Лм і робочою напругою 220–240 В. Для автономного живлення світильників та миготливих сигнальних світлофорів відповідно до проектного рішення передбачено установку двох сонячних панелей потужністю 175 Вт [9]. Об'єкти були змонтовані та введені в експлуатацію у жовтні 2019 року.

Результати розрахунку показали, що терміни автономної роботи більшості досліджуваних АОК, змонтованих з використанням обладнання відповідно до заявлених проектних рішень і представлених специфікацій, за умови повного заряду акумуляторних батарей і температурі повітря $+20^\circ\text{C}$ становлять $t_{\text{АОК}_p} \leq 21,07$ год. Середня тривалість роботи за добу протягом зазначеного періоду для досліджуваних АОК становить $t_{\text{АОК}_{\text{доб}}} \leq 7$ год.

Таким чином, відповідно до розрахунку, АОК заявленої комплектації можуть забезпечувати автономну роботу без підзарядки протягом трьох діб, працюючи по 7 годин на добу. Це дійсно правильний комплект обладнання для літнього періоду року, оскільки тривалість темного часу доби в цей період не перевищує 7 год. Однак такий комплект не здатний забезпечити стабільну роботу для зимового періоду року, оскільки тривалість нічного часу для нього становить більше 10 год, що показано на рис. 1 [11].

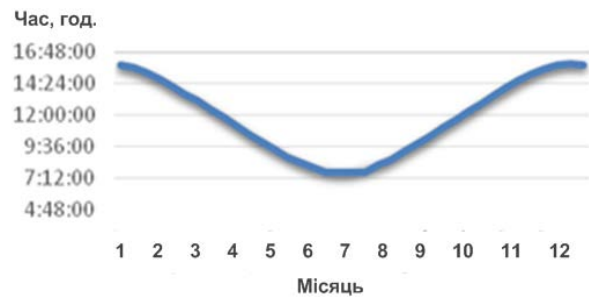


Рисунок 1 – Тривалість темного часу доби для міста Харкова (Україна)

Слід зазначити також, що рівень інсоляції в Україні є мінімальним в зимовий період року (рис. 2) [12], а температура повітря при цьому є досить низькою. Ці природні фактори не дозволяють заряджати акумулятор до 100 % ємності в зимовий період року, а холодна температура навколишнього середовища збільшує рівень розряду.

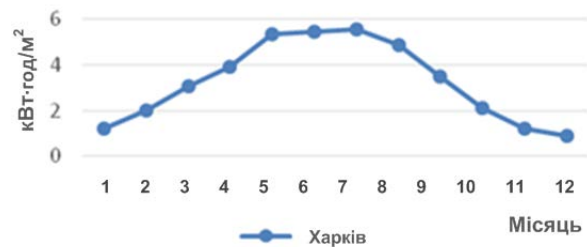


Рисунок 2 – Рівень середньомісячної сонячної інсоляції для міста Харкова (Україна)

При спостереженні за функціонуванням АОК на автомобільних дорогах Харківської області було встановлено, що в зимовий період року при мінімальній інсоляції світильники взагалі не працювали на всіх об'єктах, в той час як миготливі світлофори продовжували працювати на більшості об'єктів. Освітлення пішохідних переходів відновлювалося і працювало в нормальному режимі у дні з ясною погодою, для яких рівень освітлюваності відповідав розрахунковим значенням.

Таким чином, проведений аналіз показав, що досліджувані АОК не здатні самі себе забезпечити енергією в потрібному обсязі і нормально функціонувати при низькому рівні інсоляції і низькій температурі навколишнього середовища.

Розробка заходів для підвищення ефективності функціонування АОК автомобільних шляхів. З метою створення необхідних умов безпеки пішоходів і водіїв слід розробити заходи щодо усунення виявлених недоліків в роботі досліджуваних АОК для автомобільних шляхів та підвищення ефективності їх роботи.

Оскільки потужність джерел живлення недостатня для нормальної роботи досліджуваних АОК, слід передбачити установку додаткових джерел енергії або взагалі знайти нове рішення. Перелік запропонованих варіантів підвищення ефективності функціонування АОК для автошляхів передбачає використання готових технічних рішень, що

використовують сучасні засоби і технології: установка додаткових сонячних панелей; заміна існуючих сонячних панелей на більш потужні; установка вітрогенератора з горизонтальною або вертикальною віссю обертання; установка систем генерації енергії з електромеханічним перетворювачем.

В якості критерію для оцінки достатності розроблених заходів доцільно використовувати знак результуючої потужності АОК за розрахунковий період часу:

$$P_{\text{рез}} = \sum_{t=0}^T (P_{\text{гент}} - P_{\text{навт}}), \quad (3)$$

де $P_{\text{гент}}$ – потужність, що виробляється АОК в момент часу t ;

$P_{\text{навт}}$ – потужність навантаження освітлювального комплексу в момент часу t ;

T – тривалість розрахункового періоду.

Позитивний знак результуючої потужності АОК за розрахунковий період часу свідчить про наявність залишку виробленої потужності після покриття необхідного навантаження, що свідчить про достатній обсяг виробленої енергії для забезпечення надійної і стабільної роботи досліджуваної установки. Негативний же знак результуючої потужності за розрахунковий період часу вказує на наявність дефіциту виробленої потужності для покриття необхідного навантаження, що свідчить про недостатній обсяг виробленої енергії і призводить до нестабільної роботи АОК.

Перший варіант заходів передбачає установку додаткових сонячних панелей, оскільки існуюча комплектація АОК не забезпечує повний заряд акумулятора. Розрахунки показали, що для забезпечення стабільної роботи досліджуваного АОК потрібна установка чотирьох сонячних панелей замість двох передбачених або збільшення потужності однієї панелі зі 175 Вт до 350 Вт. Однак, це призведе до збільшення маси і парусності об'єкту, що вимагає проведення додаткової перевірки опори на механічну міцність. Значення результуючої потужності АОК при його комплектації згідно із заявленим проектним рішенням представлено у табл. 1, а після установки додаткових сонячних панелей – у табл. 2.

Для другого варіанту передбачається установка на діючі АОК вітрогенератора з горизонтальною або вертикальною віссю обертання, в результаті чого створюється гібридна система генерації енергії, що дозволяє збільшити встановлену потужність для заряду акумулятора. Таке джерело відновлюваної енергії буде більш доречним і ефективним в дні зі слабкою інсоляцією. Зовнішній вигляд такого гібридного АОК представлений на рис. 3. Слід зазначити, що такий варіант комплектації АОК також потребує перевірки опори на механічну міцність.

Таблиця 1 – Результат розрахунку результуючої потужності при базовій комплектації АОК

Місяць року	Загальна потужність, що вироблена АОК, кВт/доба	Потужність навантаження за денний період, кВт/доба	Потужність навантаження за нічний період, кВт/доба	Потужність, що акумулюється, кВт/доба	Результуюча потужність АОК за добу, кВт/доба	Результуюча потужність АОК за 3 доби, кВт/доба
Січень	0,19	0,1	0,29	0,09	-0,2	-0,6
Лютий	0,64			0,54	0,25	0,75
Березень	1,03			0,93	0,64	1,92
Квітень	1,37			1,27	0,98	2,94
Травень	1,81			1,71	1,42	4,26
Червень	1,9			1,8	1,51	4,53
Липень	1,9			1,8	1,51	4,53
Серпень	1,74			1,64	1,35	4,05
Вересень	1,2			1,1	0,81	2,43
Жовтень	0,61			0,51	0,22	0,66
Листопад	0,23			0,13	-0,16	-0,48
Грудень	0,13			0,03	-0,26	-0,78

Таблиця 2 – Результат розрахунку результуючої потужності АОК з чотирма сонячними панелями

Місяць року	Загальна потужність, що вироблена АОК, кВт/доба	Потужність навантаження за денний період, кВт/доба	Потужність навантаження за нічний період, кВт/доба	Потужність, що акумулюється, кВт/доба	Результуюча потужність АОК за добу, кВт/доба	Результуюча потужність АОК за 3 доби, кВт/доба
Січень	0,41	0,1	0,29	0,31	0,02	0,06
Лютий	1,10			1,00	0,71	2,13
Березень	1,61			1,51	1,22	3,66
Квітень	2,13			2,03	1,74	5,22
Травень	2,84			2,74	2,45	7,35
Червень	2,91			2,81	2,52	7,56
Липень	2,93			2,83	2,54	7,62
Серпень	2,76			2,66	2,37	7,11
Вересень	1,96			1,86	1,57	4,71
Жовтень	1,12			1,02	0,73	2,19
Листопад	0,64			0,54	0,25	0,75
Грудень	0,39			0,29	0,00	0

Важливим питанням є визначення найкращого варіанту комплектації такого гібридного АОК, для чого необхідно розрахувати оптимальну величину потужності та габарити вітрогенератора [13, 14].

Вітрогенератор з горизонтальною віссю є найбільш розповсюдженим типом вітрогенераторів, він може працювати лише від прямого потоку повітря на лопаті пропелера. Потужність для такого типу вітрогенераторів залежить від розміру вітроколеса та сили вітру [15] і визначається вона за виразом:

$$P_{гв} = \xi \cdot \pi \cdot R^2 \cdot 0.5 \cdot V^3 \cdot \rho \cdot \eta_1 \cdot \eta_2, \quad (4)$$

де ξ – коефіцієнт використання енергії вітру;
 R – радіус вітроколеса;
 V – швидкість повітряного потоку;
 ρ – щільність повітря;
 η_1 – ККД редуктора;
 η_2 – ККД генератора.



Рисунок 3 – Гібридний АОК для автошляхів з сонячною панеллю та вітрогенератором

Відповідно до виразу (4) була визначена потужність вітрогенераторів для досліджуваних освітлювальних комплексів, величина якої становила 18÷32 Вт. Установка запропонованих вітрогенераторів з горизонтальною віссю обертання допоможе досліджуваним АОК працювати більш ефективно, про що свідчать результати табл. 3.

Таблиця 3 – Результат розрахунку результуючої потужності АОК з двома сонячними панелями та вітрогенератором з горизонтальною віссю

Місяць року	Загальна потужність, що вироблена АОК, кВт/доба	Потужність навантаження за денний період, кВт/доба	Потужність навантаження за нічний період, кВт/доба	Потужність, що акумулюється, кВт/доба	Результуюча потужність АОК за добу, кВт/доба	Результуюча потужність АОК за 3 доби, кВт/доба
Січень	0,42	0,1	0,29	0,34	0,05	0,15
Лютий	0,94			0,86	0,57	1,71
Березень	1,33			1,25	0,96	2,88
Квітень	1,69			1,61	1,32	3,96
Травень	2,16			2,08	1,79	5,37
Червень	2,30			2,22	1,93	5,79
Липень	2,35			2,27	1,98	5,94
Серпень	2,04			1,96	1,67	5,01
Вересень	1,55			1,47	1,18	3,54
Жовтень	0,97			0,89	0,6	1,8
Листопад	0,63			0,55	0,26	0,78
Грудень	0,4			0,32	0,03	0,09

Використання вітрогенератора з вертикальною віссю для досліджуваних АОК має меншу ефективність

у порівнянні з вітрогенератором з горизонтальною віссю, проте його застосування дозволяє поліпшити роботу досліджуваної системи. Перевагою вітрогенераторів з вертикальною віссю є те, що такі генератори можуть працювати не тільки від прямого потоку повітря, а ще й від потоку повітря при русі транспортних засобів, що проїжджають повз освітлювальний комплекс.

Розрахунок потужності вітрогенератора з вертикальною віссю проводиться в залежності від кількості встановлених лопатей. Для досліджуваного АОК пропонується застосування вітрогенератора з трьома лопатями, особливості конструкції якого представлені на рис. 4.

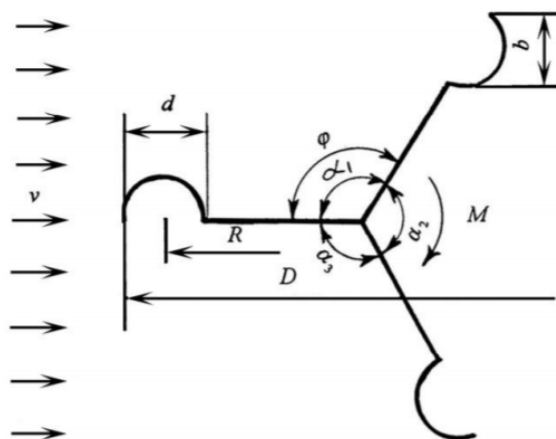


Рисунок 4 – Схема 3-лопатевого вітрогенератора з вертикальною віссю

Основні параметри запропонованого вітрогенератора з вертикальною віссю наступні:

- діаметр вітроколеса $D = 0,7$ м;
- діаметр лопаті $d = 0,095$ м;
- кут між осями кріплення лопатей $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 120^\circ$;
- висота вітроколеса $H = 1$ м;
- кут повороту вітроколеса φ .

Обертовий момент, що виникає за рахунок аеродинамічних сил на кожній із лопатей, визначається за виразом [16]:

$$M_i = 0.5 \cdot C_i \cdot \rho \cdot S_i \cdot V^2 \cdot L_i, \quad (5)$$

де S_i – площа проєкції лопаті;
 L_i – плече сили тиску.

Відповідно до розрахунку середній момент обертання для запропонованого вітрогенератора дорівнює 0,32 Н/м. На основі цього значення можна визначити середній обертовий момент ротора з трьома лопатями за виразом:

$$M_{cp} = C_{max} \cdot M_{cp}^* \cdot \rho \cdot V^2 \cdot d \cdot D \cdot H, \quad (6)$$

де C_{max} – максимальне значення коефіцієнту опору;
 M_{cp}^* – усереднене значення обертового моменту по лопатям.

Потужність ротора для вітрогенератора з вертикальною віссю знаходимо за формулою [17]:

$$P_{\text{ВВ}} = \omega \cdot M_{\text{ср}}, \quad (7)$$

де ω – кутова швидкість, що визначається виразом:

$$\omega = \frac{Z \cdot R}{V}, \quad (8)$$

де Z – швидкохідність лопатей вітрогенератора, яка для даного ротора дорівнює 0,5;

R – радіус ротора.

Проведені розрахунки показали, що для вітрогенераторів, що пропонуються для встановлення на досліджуваних АОК, величина середнього обертового моменту ротора становить $M_{\text{ср}} = 0,17$ Н/м. Відповідно до чого, значення кутової швидкості дорівнює $\omega = 0,08$ Рад/с, а розрахункова потужність вітрогенераторів з вертикальною віссю становить $P_{\text{ВВ}} = 13,6$ Вт. Таким чином, доцільно прийняти для встановлення на досліджуваних АОК вітрогенератори з вертикальною віссю та номінальною потужністю $P_{\text{ВВном}} = 20$ Вт.

Згідно з отриманими даними можна зробити висновок, що використання вітрогенераторів з вертикальною віссю для досліджуваних АОК має меншу ефективність, ніж застосування вітрогенератора з горизонтальною віссю, проте його використання дозволяє покращити роботу досліджуваної системи, про що свідчать результати табл. 4.

Таблиця 4 – Результат розрахунку результуючої потужності АОК з двома сонячними панелями та вітрогенератором з вертикальною віссю

Місяць року	Загальна потужність, що вироблена АОК, кВт/доба	Потужність навантаження за денний період, кВт/доба	Потужність навантаження за нічний період, кВт/доба	Потужність, що акумулюється, кВт/доба	Результуюча потужність АОК за добу, кВт/доба	Результуюча потужність АОК за 3 доби, кВт/доба
Січень	0,39	0,1	0,29	0,31	0,02	0,057
Лютий	0,7			0,62	0,33	0,987
Березень	1,07			0,99	0,7	2,097
Квітень	1,45			1,37	1,08	3,237
Травень	1,87			1,79	1,5	4,497
Червень	2			1,92	1,63	4,887
Липень	2,01			1,93	1,64	4,917
Серпень	1,86			1,78	1,49	4,467
Вересень	1,3			1,22	0,93	2,787
Жовтень	0,67			0,59	0,3	0,897
Листопад	0,44			0,36	0,07	0,207
Грудень	0,41			0,33	0,04	0,117

Ще одним заходом щодо підвищення ефективності роботи досліджуваних АОК для автошляхів є встановлення систем перетворення

кінетичної енергії проїжджаючого автотранспорту в електричну. Такі системи набирають велику популярність у багатьох країнах світу, забезпечуючи електроенергією багато різних придорожніх об'єктів [18].

Для створення такої системи в покриття дорожнього полотна вбудовуються товстолистові шини, всередині яких встановлена рухома частина та генератор з маховиком. При проїзді транспортних засобів по таким шинам рухома частина опускається під вагою автомобіля на певну глибину, призводить до переміщення рейок приводу електричного генератора, які через циліндричний мультиплікатор обертають ротор генератора. Загальний вигляд такої системи генерації електричної енергії з електромеханічним перетворювачем представлений на рис. 5, який відображає основний принцип її роботи. Ця система генерації електричної енергії додатково підвищує безпеку руху при встановленні біля пішохідних переходів, змушуючи транспортні засоби знижувати швидкість за принципом «лежачого поліцейського» [19]. Потужність одного такого перетворювача може складати 50–75 Вт.

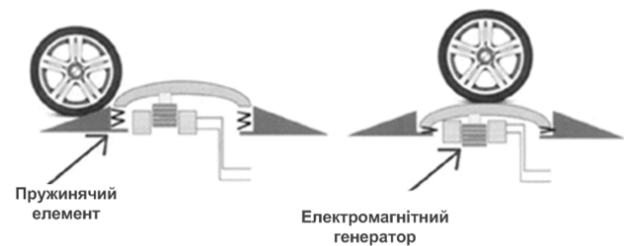


Рисунок 5 – Система генерації електричної енергії з електромеханічним перетворювачем [20]

Додаткова установка електромеханічного перетворювача для живлення АОК пішохідного переходу забезпечить підвищення ефективності його функціонування, про що свідчать результати розрахунку, представлені у табл. 5.

Аналіз результатів розрахунку щодо застосування різних заходів для поліпшення роботи АОК для пішохідних переходів, представлених в табл. 2–5, показує, що найбільш ефективним заходом забезпечення безперебійної роботи є застосування системи генерації електричної енергії з електромеханічним перетворювачем. Однак слід зазначити, що установка такої системи є дуже дорогим заходом в порівнянні з установкою додаткового вітрогенератора або сонячної панелі.

Таким чином, запропоновані заходи підвищення ефективності роботи АОК для автомобільних шляхів України дозволяють використовувати готові технічні засоби для вирішення досліджуваної проблеми. Слід зазначити, що вартість розглянутих заходів значно відрізняється між собою, що необхідно враховувати при обґрунтуванні вибору конкретного рішення для практичного застосування.

Таблиця 5 – Результат розрахунку результуючої потужності АОК з двома сонячними панелями та електромеханічним перетворювачем

Місяць року	Загальна потужність, що вироблена АОК, кВт/доба	Потужність навантаження за денний період, кВт/доба	Потужність навантаження за нічний період, кВт/доба	Потужність, що акумулюється, кВт/доба	Результуюча потужність АОК за добу, кВт/доба	Результуюча потужність АОК за 3 доби, кВт/доба
Січень	1,09	0,1	0,29	1,006	0,719	2,157
Лютий	1,54			1,456	1,169	3,507
Березень	1,93			1,846	1,559	4,677
Квітень	2,27			2,186	1,899	5,697
Травень	2,71			2,626	2,339	7,017
Червень	2,8			2,716	2,429	7,287
Липень	2,8			2,716	2,429	7,287
Серпень	2,64			2,556	2,269	6,807
Вересень	2,1			2,016	1,729	5,187
Жовтень	1,51			1,426	1,139	3,417
Листопад	1,13			1,046	0,759	2,277
Грудень	1,03			0,946	0,659	1,977

Висновки. Аналіз особливостей проектування і експлуатації АОК для автомобільних шляхів України показав, що дані системи мають недоліки в роботі, пов'язані з нестабільністю роботи при низькій температурі та невисокому рівні інсоляції. Причинами нестабільної роботи АОК є недостатня точність врахування фактичних кліматичних умов експлуатації об'єктів при формуванні проектних рішень. Для усунення цього недоліку для АОК, які вже експлуатуються, необхідна розробка і впровадження заходів щодо підвищення ефективності їх функціонування. Доцільним при розробці таких заходів буде застосування готових технічних рішень, що використовують сучасні засоби і технології.

Запропоновано критерій достатності застосування розроблених заходів щодо підвищення ефективності експлуатації АОК для автошляхів, в якості якого прийняти знак результуючої потужності комплексу за розрахунковий період часу. Розрахунок даного критерію для досліджуваних АОК довів доцільність застосування запропонованих заходів для вирішення задачі забезпечення автономного живлення освітлювальних комплексів.

Проведені дослідження довели недостатність використання тільки сонячних панелей для живлення АОК автошляхів, розташованих в регіонах з нестабільним рівнем інсоляції. Кількісно підтверджено, що доцільним є застосування гібридних систем живлення АОК, в яких, крім сонячних панелей, використовуються додаткові джерела живлення (вітрогенератори, системи з електромеханічними перетворювачами та інші).

Обґрунтування вибору оптимального варіанту заходів щодо підвищення ефективності роботи АОК для автомобільних шляхів вимагає врахування

реальних технічних і кліматичних умов експлуатації комплексів, а також можливостей сучасних технічних засобів і вартості всіх їх складових.

Список літератури

- Єфименко Р. В., Попович Н. І., Беленчук О. В. Аналіз причин виникнення ДТП і розробка заходів із підвищення безпеки дорожнього руху. *Науково-виробничий журнал*. 2015. № 6 (248). С. 34–35.
- ДБН В.2.5-28: 2018. *Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення*. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2018. 133 с.
- Kumar N. M., Singh A. K., Kumar Reddy K. V. Fossil Fuel to Solar Power: A Sustainable Technical Design for Street Lighting in Fugar City, Nigeria. *Department of Electrical & Electronics Engineering, Bharat Institute of Engineering & Technology*. 2016. № 93.P. 956–966.
- Чумакевич В. О., Атаманюк В. В., Пулеко І. В., Дубовський А. М. Обґрунтування можливості освітлення парків в місцях постійної дислокації за допомогою сонячних батарей у Львівській області. *Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного*. 2015. Т. 13, № 2. С. 102–105.
- Fashina A. A., Azeko S. T., Asare J., Ani C. J., Anye V. C., Rwenyagala E., Dandogbessi B. S., Oladele O., Dyeris M. A study on the reliability and performance of solar powered street lighting systems. *International Journal of Scientific World*. 2017. № 5 (2). P. 110–116. doi: 10.14419/ijsw.v5i2.8109.
- Baburajan S., Osman A., Alzarooni F. A. Solar Powered LED Street Lighting System. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016. № 1088967. P. 1–8. doi: 10.13140/RG.2.2.26957.44009.
- Fujii Y., Yoshiura N., Takita A., Ohta N. Smart street light system with energy saving function based on the sensor network. *Proceedings 4th Int. Conf. on Future Energy Systems (e-Energy'13)*. Berkeley, California, USA, 2013. P. 271–272.
- Yang Z., Zhang X., Wang Ch. Solar LED Intelligent Lighting Systems Based on Internet of Things and New Energy Storage System. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. № 687–691. P. 3281–3284. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.687-691.3281>
- Офіційний ресурс по державним закупівлям в Україні, ProZorro*. URL: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2019-07-09-000721-b> (дата звернення: 23.10.2020).
- ДСТУ EN 60598-1:2017. *Світильники. Частина 1. Загальні вимоги та випробування (EN 60598-1:2015; AC:2015; AC:2016; AC:2017, IDT; IEC 60598-1:2014, MOD; COR1:2015; COR2:2015; COR3:2017, IDT)*. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 162 с.
- Гідрометеорологічний центр України. *Поточна погода в Харкові*. URL: <https://meteo.gov.ua/en/34300/current/ukraine> (дата звернення: 25.10.2020).
- NASA Prediction of Worldwide Energy Resources / National Aeronautics and Space Administration*. URL: <https://power.larc.nasa.gov/> (дата звернення: 25.10.2020).
- Півняк Г. Г., Шкрабець Ф. П., Нойбергер Н., Ципленков Д. В. *Основи вітроенергетики*. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2015. 335 с.
- Кудря С. О., Головкин В. М. *Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії*. Київ: НТУ КПІ, 2019. 196 с.
- Гармаш Є. В. Розрахунок вітрогенератора в сільській місцевості. *Наукові розробки молоді на сучасному етапі. Тези доповідей XVI Всеукраїнської наукової конференції молодих вчених та студентів. Т. 2: Мехатронні системи і комп'ютерні технології. Ресурсозбереження та охорона навколишнього середовища (27-28 квітня 2017 р., Київ)*. Київ: КНУТД, 2017. С. 400-401.
- Claessens M. C. *The Design and Testing of Airfoils for Application in Small Vertical Axis Wind Turbines: Master of Science Thesis*. Delft University of Technology, 2006. 115 p.
- Fedak W., Anweiler S., Gancarski W., Ulbrich R. Determination of the number of vertical axis wind turbine blades based on power spectrum. *Proceedings Int. Conf. Energy on Environment and*

- Material Systems (EEMS 2017)*. Polanica-Zdrój, Poland, 2017. № 19. P. 1–6.
18. Del Castillo-García G., Blanco-Fernandez E., Pascual-Muñoz P., Castro-Fresno D. Energy harvesting from vehicular traffic over speed bumps: A review. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy*. 2018. Vol. 2. № 171. P. 58–69.
 19. Гнатів А. В., Аргун І. В. Пат. на корисну модель UA 129625 U, Україна. *Спосіб генерування електричної енергії та примусового зниження швидкості з мультиплікатором*. 2018.
 20. Dmitriev V. Patent US 2013/0193692 A1, United States. *Electric Power Generating Speed Bump*. 2013.
 9. *Oficijnyj resurs po derzhavny'm zakupivlyam v Ukraini, ProZorro* [Official resource for public procurement in Ukraine, ProZorro]. Available at: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2019-07-09-000721-b> (accessed 23.10.2020).
 10. DSTU EN 60598-1: 2017. *Svityl'ny'ky'. Chasty'na 1. Zagal'ni vy'mogy' ta vy'probuvannya* [State Standard 60598-1: 2017 Luminaires. Part 1. General requirements and tests]. Kyiv, State Enterprise "UkrNDNC" Publ., 2019. 162 p.
 11. *Potochna pogoda v Xarkovi* [Hydrometeorological Centre of Ukraine]. Available at: <https://meteo.gov.ua/en/34300/current/ukraine> (accessed 25.10.2020).
 12. *NASA Prediction of Worldwide Energy Resources* / National Aeronautics and Space Administration. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/> (accessed 25.10.2020).
 13. Pivnyak G. G., Shkrabec' F. P., Nojberger N., Cy'plenkov D. V. *Osnovy' vitroenergety'ky'* [Fundamentals of Wind Power]. Dnipropetrovs'k: Nacional'ny'j girny'chy'j universy'tet Publ., 2015. 335 p.
 14. Kudrya S. O., Golovko V. M. *Osnovy' konstruyuvannya energostanovok z vidnovlyuvany'my' dzherelamy' energiyi* [Fundamentals of designing energy installations with renewable energy sources]. Kyiv, NTU KPI Publ., 2019. 196 p.
 15. Garmash Ye. V. Rozraxunok vitrogeneratora v sil's'kij miscevoosti [Calculating a wind turbine in a rural area]. *Naukovi rozrobky' molodi na suchasnomu etapi. Tezy' dopovidej XVI Vseukrayins'koyi naukovoyi konferenciyi molody'x vcheny'x ta studentiv. T. 2: Mexatronni' sy'stemy' i komp'yuterni' tekhnologiyi. Resursozbezpezhennya ta oxorona navkoly'shn'ogo seredovy'sha (27-28 kvitnya 2017 r., Ky'yiv)* [Theses of reports of XVI All-Ukrainian scientific conference of young scientists and students. T. 2: Mechatronic systems and computer technologies. Resource saving and environmental protection (27–28 April 2017, Kyiv)]. Kyiv, KNUTD Publ., 2017. pp. 400–401.

References (transliterated)

1. Yefy'menko R. V., Popovy'ch N. I., Belenchuk O. V. Analiz pry'chy'n vy'ny'knennya DTP i rozrobka zahodiv iz pidvy'shennya bezpeky' dorozhn'ogo руху [Analyse the causes of accidents and develop measures to improve road safety]. *Naukovo-vy'robny'chy'j zhurnal*. 2015, No. 6 (248), pp. 34–35.
2. DBN B.2.5-28: 2018. *Inzhenerne obladnannya budy'nkiv i sporud. Pry'rodne i sztuchne osvittennya* [State Building Code B.2.5-28: 2018 Engineering equipment of buildings and structures. Natural and artificial lighting]. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine Publ., 2018. 133 p.
3. Kumar N. M., Singh A. K., Kumar Reddy K. V. Fossil Fuel to Solar Power: A Sustainable Technical Design for Street Lighting in Fugar City, Nigeria. *Department of Electrical & Electronics Engineering, Bharat Institute of Engineering & Technology*. 2016, No. 93, pp. 956–966.
4. Chumakevy'ch V. O., Atamanyuk V. V., Puleko I. V., Dubovs'ky'j A. M. Obg'runtuvannya mozhy'vosti osvittennya parkiv v miscyax postijnoyi dy'slokaciyi za dopomogyu sonyachny'x batarej u L'vivs'kij oblasti [Justification for the possibility of lighting parks in permanent locations with solar panels in the Lviv region]. *Nacional'na akademiya suxoputny'x vijs'k imeni get'mana Petra Sagajdachnogo*. 2015, vol. 13, no. 2, pp. 102–105.
5. Fashina A. A., Azeko S. T., Asare J., Ani C. J., Anye V. C., Rwenyagila E., Dandogbessi B. S., Oladele O., Dyeris M. A study on the reliability and performance of solar powered street lighting systems. *International Journal of Scientific World*. 2017, No. 5 (2), pp. 110–116. doi: 10.14419/ijsw.v5i2.8109.
6. Baburajan S., Osman A., Alzarooni F. A. Solar Powered LED Street Lighting System. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016, No. 1088967, pp. 1–8. doi: 10.13140/RG.2.2.26957.44009.
7. Fujii Y., Yoshiura N., Takita A., Ohta N. Smart street light system with energy saving function based on the sensor network. *Proceedings 4th Int. Conf. on Future Energy Systems (e-Energy'13)*. Berkeley, California, USA Publ., 2013, pp. 271–272.
8. Yang Z., Zhang X., Wang Ch. Solar LED Intelligent Lighting Systems Based on Internet of Things and New Energy Storage System. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, No. 687–691, pp. 3281–3284. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.687-691.3281>.

Надійшла (received) 15.12.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Довгалик Оксана Миколаївна (Довгалик Оксана Николаевна, Dovgalyuk Oksana Mykolayivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1994-619X>; e-mail: Dovgalyuk_O@kpi.edu.ua.

Бондаренко Роман Вікторович (Бондаренко Роман Викторович, Bondarenko Roman Viktorovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри передачі електричної енергії; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6081-5020>; e-mail: elektrotehnika245@ukr.net.

Яковенко Іван Сергійович (Яковенко Иван Сергеевич, Yakovenko Ivan Serhiyovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри передачі електричної енергії; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9934-2841>; e-mail: i.c.jakovenko@gmail.com.