

О.В. БАБЕНКО

Вінницький національний технічний університет

А.А. ВИДМИШ, А.А. ШТУЦЬ

Вінницький національний аграрний університет

НАБЛИЖЕНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ОСВІТЛЕНОСТІ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО АУДИТУ СИСТЕМИ ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ

В статті проаналізовано процес практичного визначення освітленості світильників зовнішнього освітлення. Наведено схеми здійснення світлотехнічних вимірювань. Для вимірювання освітленості на невеликих відстанях можна використати схему з горизонтальним розміщенням світильника, а для вимірювання на значних відстанях доцільно використати схему з вертикальним розміщенням світильника. Досліди за такими схемами нескладно реалізувати в реальних умовах діяльності енергоаудитора, оскільки потребують лише засобів кріплення світильника з можливістю його повороту на заданий кут і вимірювального пристрою – люксметра. Здійснено порівняння способів визначення освітленості: з використанням кривої сили світла, що побудована за результатами світлотехнічних вимірювань на значній відстані від світильника; з використанням кривої сили світла, що побудована за результатами світлотехнічних вимірювань на невеликій відстані від світильника та з використанням регресійних моделей. Встановлено, що перший спосіб більш ефективний за необхідності визначення освітленості на відстані понад 8 м, другий – на відстані до 8 м, а третій – за будь-якої відстані. Особливість третього способу полягає в необхідності отримання значної кількості результатів світлотехнічних вимірювань для багатьох напрямів розповсюдження світлового потоку. Під час аналізу можливості використання регресійних моделей для побудови аналітичної залежності освітленості від відстані від світильника враховано, що ця залежність має гіперболічний характер. Таким чином запропоновано використовувати нелінійну однофакторну регресійну модель для гіперболічної функціональної залежності. Поєднання вказаних способів дозволяє запропонувати метод визначення освітленості світильниками зовнішнього освітлення, в основу якого покладено використання побудованих наближених кривих сили світла на основі вимірювань освітленості на конкретних відстанях та з використанням регресійної моделі. Метод може бути використаний для попередньої оцінки значення освітленості під час енергетичного аудиту системи зовнішнього освітлення.

Ключові слова: освітленість, крива сили світла, регресійна модель.

O.V. BABENKO

Vinnytsia National Technical University

A.A. VIDMISH, A.A. SHUTS

Vinnytsia National Agrarian University

APPROXIMATE METHOD OF DETERMINING LIGHTING DURING THE EXECUTION OF THE ENERGY AUDIT OF THE EXTERNAL LIGHTING SYSTEM

The article analyzes the process of practical determination of the illumination of outdoor lighting fixtures. Shows the implementation of lighting measurements. For measuring illumination at short distances, you can use a scheme with horizontal placement of the lamp, and for measuring illumination at long distances - it is advisable to use a scheme with vertical placement of the lamp. Experiments on such schemes are easy to implement in real-life conditions of the energy auditor, since they require only fixing means for the luminaire with the possibility of its rotation at a given angle and a measuring device - a luxmeter. A comparison was made of methods for determining the illumination: using the luminous intensity curve based on the results of lighting measurements at a considerable distance from the luminaire; using the light intensity curve based on the results of lighting measurements at a short distance from the luminaire and using regression models. It was found that the first method of determining illumination is more effective if it is necessary to determine illumination at a distance of more than eight meters, the second method of determining illumination at a distance of up to eight meters, and the third method of determining illumination at any distance. The feature of the third method is the need to obtain a significant number of results of lighting measurements for many directions of propagation of the light flux. When analyzing the possibility of using regression models to build an analytical dependence of illumination on distance from a lamp, it was taken into account that this dependence is hyperbolic in nature. Thus, it is proposed to use a non-linear single-factor regression model for hyperbolic functional dependence. The combination of these methods allows us to propose a method for determining the illumination of outdoor lighting fixtures, which is based on the use of constructed approximate light intensity curves based on measurements of illumination at specific distances and using a regression model. The method can be used for a preliminary assessment of the value of illumination during an energy audit of an outdoor lighting system.

Key words: illumination, light intensity curve, regression model.

Постановка проблеми

Енергетичний аудит освітлювальних установок є важливим і все більш перспективним напрямом діяльності в народному господарстві. Серед характеристик, які часто необхідно отримати аудиторю, є крива сили світла світильника і значення освітленості в конкретних точках. Особливо це актуально у випадку роботи з новими світильниками, зокрема світлодіодними, які широко розробляються підприємствами України.

Аналіз основних джерел

Постає задача розроблення методу визначення освітленості, який дозволить отримати результати з точністю, достатньою для попередньої оцінки якості роботи світильника. Відомою є формула для визначення освітленості на робочій поверхні від точкового світильника:

$$E = \frac{I_{\alpha} \cdot \cos \alpha}{l^2}, \quad (1)$$

де I_{α} – сила світла при певному куті α , кд; l – відстань від світильника до розрахункової поверхні, м. Відповідно до цієї формули

$$I_{\alpha} = \frac{E \cdot l^2}{\cos \alpha}. \quad (2)$$

Формула (1) показує, що для розрахунку значення освітленості в конкретній точці необхідно мати інформацію про сили світла при різних кутах для світильника, що досліджується. В умовах проведення енергоаудиту може виникнути ситуація, коли на підприємстві використовується світильник, для якого виникає складність знайти інформацію про криву сили світла. Це може бути з найрізноманітніших причин, наприклад, світильник виготовлено маловідомим виробником, який не дав чіткої інформації про світлорозподіл. В такому випадку постає актуальна задача побудови наближених методів розрахунку освітленості на основі кривої сили світла, що знята самим аудитором на наявному в нього обладнанні. З огляду на формулу (1), запропоновано визначати освітленість точках на основі експериментально отриманих значень сили світла енергоаудитором. Експериментальна крива сили світла без спеціального обладнання може бути побудована з огляду на формулу (2) шляхом вимірювання освітленостей навколо світильника в точках з відстанню l , що описують коло. Таке вимірювання може бути виконане люксометром в площинах, що завжди перпендикулярні центральній вісі світильника і становлять з нею кут α . Постає питання вибору відстані l . В багатьох літературних джерелах, наприклад [1–7] відмічено, що для ефективного зняття кривої сили світла необхідно забезпечити відстань до точки вимірювання, в якій світильник можна вважати точковим. Для світильників вуличного освітлення ця відстань повинна перевищувати 2 м. З практичної точки зору під час проведення енергетичного аудиту зручно вимірювати освітленість або при горизонтальному розміщенні світильника, однак порівняно невеликих значеннях l (2–2,5 м) (рис. 1а), або при вертикальному розміщенні світильника, коли ця відстань збільшена до необхідного для практики значення (рис. 1б). В останньому випадку, оскільки світильник повинен бути розміщений паралельно до світлочутливого елемента люксометра, то їх обидва необхідно повертати на кут α [8].

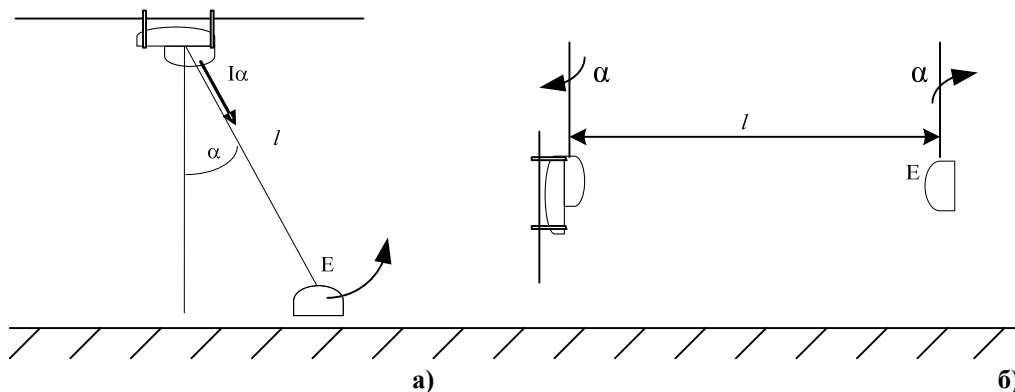


Рис. 1. Схеми проведення дослідів: а) з горизонтальним розміщенням світильника; б) з вертикальним розміщенням світильника

Було проведено дослідження світильника вуличного освітлення ЖКУ-11У-70-011 з натрієвою лампою, потужністю 70 Вт, а також світильника РКУ-13-125-002 зі світлодіодами, потужністю 45 Вт. На початку дослідів було отримано експериментальні залежності освітленості від відстані до точки її вимірювання. На рис. 2 для прикладу наведено залежність освітленості на вісі $\alpha = 0^\circ$. Крива 1 характеризує світлодіодний світильник, а крива 2 – світильник з натрієвою лампою. Характер кривих показав, що наближено лінійна залежність спостерігається на відстані, більшій за 8 м.

Тому подальші дослідження виконані для двох випадків: при відстані від джерела світла 3–8 м і при відстані 8–15 м. Максимальна відстань в досліді пояснюється тим, що, враховуючи висоти опор вуличного освітлення і відстані між останніми, достатньо досліджувати освітленість на відстані орієнтовно до 15 м.

Мета роботи: визначити і проаналізувати освітленість на основі кривої сили світла, що побудована за результатами дослідів, виконаних за схемами, що наведені на рис. 1, тобто при горизонтальному і вертикальному розміщенні світильників. Такі досліді нескладно реалізувати в реальних умовах діяльності енергоаудитора, оскільки потребують лише пристроїв для закріплення світильника з можливістю його повороту на заданий кут і люксометра, наприклад типу Ю 116.

Виклад основного матеріалу

Враховуючи, що залежність $E(l)$ має гіперболічний характер, запропоновано також визначати освітленість в потрібних точках з використанням нелінійної однофакторної регресійної моделі для

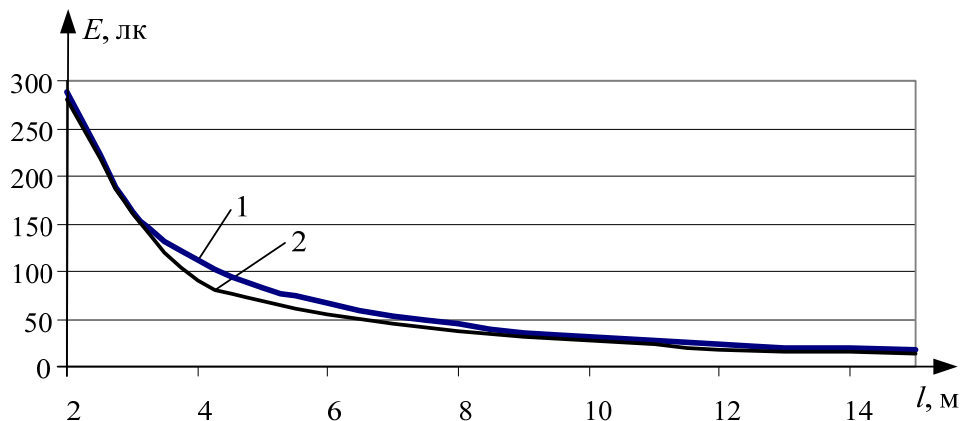


Рис. 2. Залежності освітленості для світильників: 1 – з натрієвою лампою, 2 – зі світлодіодами

гіперболічної функціональної залежності [9]:

$$E(l) = b_0 + \frac{b_1}{l}, \tag{3}$$

де коефіцієнти b_0 , b_1 визначаються з системи рівнянь $\begin{cases} ab_0 + cb_1 = d \\ cb_0 + fb_1 = g \end{cases}$, в якій a, c, d, f, g – коефіцієнти, що визначаються на основі зібраних під час вимірювань даних E_i на конкретних відстанях l_i , а саме: $a = \sum l_i$, $c = \sum \frac{1}{l_i}$, $d = \sum E_i$, $f = \sum \frac{1}{l_i^2}$, $g = \sum \frac{E_i}{l_i}$.

Враховуючи вищевикладені пропозиції було проведено вимірювання і виконано математичне моделювання. Результати наведено на рис. 3.

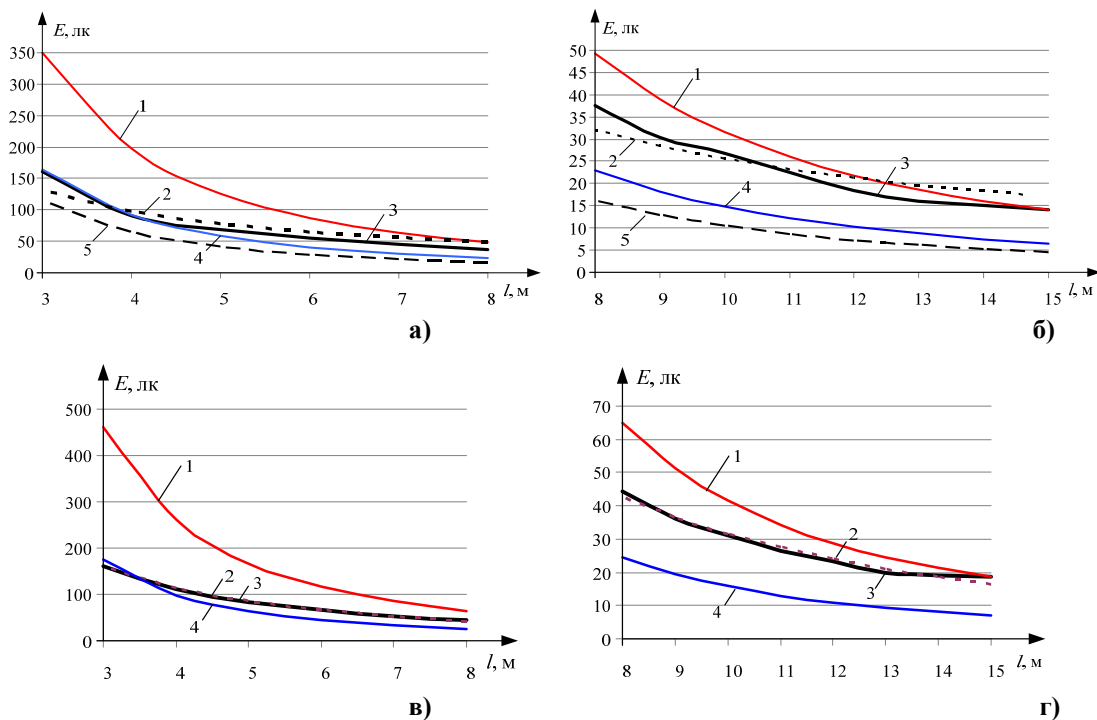


Рис. 3. Результати досліджень світильника з натрієвою лампою (а, б) та із світлодіодами (в, г)

На рис. 3 крива 1 – залежність освітленості, що розрахована на основі експериментальної кривої сили світла, яка побудована з використанням вимірювань освітленості на значній відстані від світильника (за схемою, що на рис. 1б на відстані 15 м); 2 – залежність освітленості, що побудована з використанням нелінійної однофакторної регресійної моделі для гіперболічної функціональної залежності; 3 – залежність освітленості, що отримана експериментально з використанням люксметра; 4 – залежність освітленості, що розрахована на основі експериментальної кривої сили світла, яка побудована з використанням вимірювань освітленості на невеликій відстані від світильника (за схемою, що на рис. 1а на відстані 2,5 м); 5 – залежність

освітленості, що отримана на основі кривої сили світла виробника світильників. Крива 5 наведена тільки для світильника ЖКУ-11У-70-011 із натрієвою лампою, а світильник із світлодіодами є експериментальним зразком, не є на стадії виробництва і наданий для його дослідження організацією-розробником.

Аналіз вищенаведених залежностей дозволяє відмітити наступне. У випадку використання запропонованого методу отримання освітленості на основі побудованої наближеної кривої сили світла за схемою рис. 1б (з використанням вимірювання освітленості на значній відстані), помічено, що при відстані від світильника, більший ніж 8 м, розбіжність між експериментальною і теоретичною кривими зменшується. При меншій відстані, ніж 8 м, навпаки – точнішим є визначення освітленості на основі даних з кривої сили світла, що побудована на основі вимірювань на невеликій відстані (2–2,5 м). Використання регресійної моделі є найбільш точним, однак потребує більшої кількості даних. Для його ефективного практичного застосування необхідно побудувати регресійні функції для багатьох напрямів світлового потоку в декількох меридіанних площинах.

Зацікавлення викликала крива 5, що побудована на основі табличних даних підприємства-виробника про значення сили світла. Ця крива є подібна до експериментально вимірної, однак розташована дещо нижче. Причиною розбіжності є наявність відбитої складової освітленості в приміщенні проведення дослідження, яка завищує покази люксметра під час експерименту. Наближене вимірювання зазначеної відбитої складової показало, що її значення лежить в межах 5–35 лк (в середньому 20 лк) в залежності від точки на вісі вимірювання. З рис 3б видно, що розбіжність між кривими 3 та 5 є в межах 20 лк. З цього ж рисунку випливає, що більш достовірні результати в реальних умовах проведення аудиторського дослідження (за наявності стін приміщення, що спричиняють появу відбитої складової освітленості) виникають в результаті використання кривої сили світла, яка побудована на основі ближніх вимірювань освітленості (2,5 м). Вказана висота пояснюється ще й практичною можливістю аудитора проводити вимірювання вручну. Точніший результат спостерігається і на ділянці вимірювання до 8 м.

Побудова регресійної моделі може бути потрібною для проведення перехресної перевірки результатів, що отримані на основі побудованої наближеної кривої сили світла. Однак, для забезпечення достовірних результатів необхідно суттєво знизити відбиту складову освітленості. Останнє може бути досягнуто шляхом закриття стін приміщення, в якому відбувається дослідження матеріалом з якомога меншим коефіцієнтом відбиття (наприклад чорною матовою тканиною). З рис. 3в,г видно, що характер залежностей для світильника із світлодіодами дозволяє сформулювати подібні висновки. Важливість застосування запропонованого методу

На рис. 4 наведено криві сили світла досліджуваних світильників, що побудовані з використанням вище запропонованого методу.

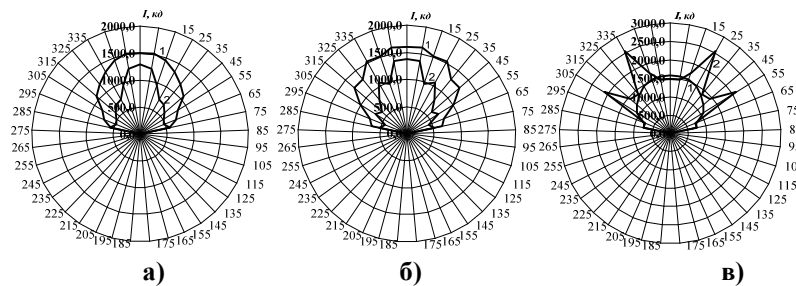


Рис. 4. Криві сили світла для світильників із світлодіодами (1) і з натрієвою лампою (2) в меридіанних площинах 0° (а), 45° (б), 90° (в)

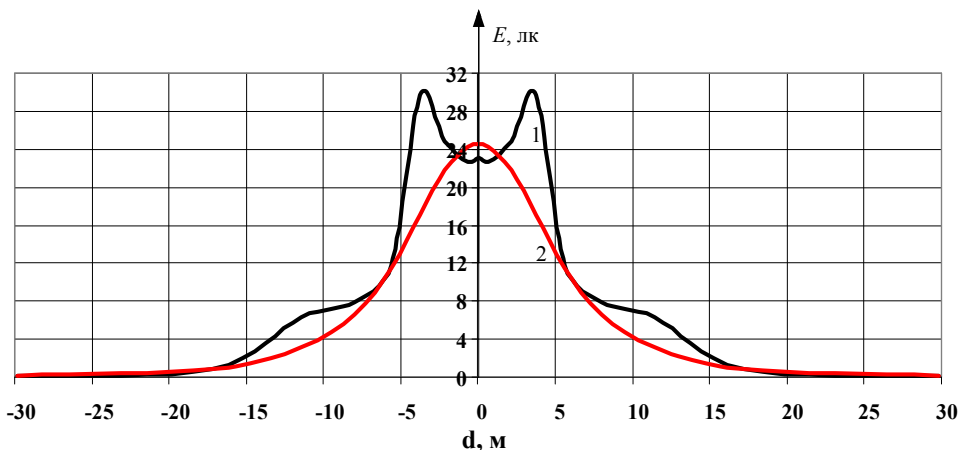


Рис. 5. Розрахунок освітленості на відстані d від освітлювальної опори, висотою 8 м: 1 – для світильника з натрієвою лампою, 2 – для світильника із світлодіодами

На рис. 5 наведено залежності освітленості, яка створюється на землі від світильника, що

розташований на опорі висотою 8 м. Освітленість розрахована на основі кривих сили світла в поперечній меридіанній площині світильника (вздовж вулиці) (рис. 4в)

Аналіз рис. 5 дозволяє зробити висновок, що за необхідності створення мінімальної освітленості 4 лк, світильник зі світлодіодами забезпечує її на відстані 10 м, а світильник з натрієвою лампою – 13 м. Рекомендацією енергоаудитора може бути доцільність застосування світлодіодного світильника, який, забезпечуючи необхідну освітленість, сприяє економії електроенергії, оскільки потужність світлодіодів – 45 Вт, що на 35% менше ніж натрієвої лампи. Іншою рекомендацією енергоаудитора в даному випадку може бути доцільність виробнику світлодіодного світильника розширити поперечну криву сили світла для збільшення площі освітлення, наприклад, з використанням спеціальних оптичних лінз.

Висновок

Запропоновано метод визначення освітленості в системі зовнішнього освітлення, в основу якого покладено побудову наближеної кривої сили світла на основі вимірювань освітленості на конкретних відстанях та використання регресійної моделі. Він є прийнятним за умови проведення енергетичного аудиту за відсутності високоточного лабораторного обладнання. Результати використання методу є достатніми для формування попередніх висновків про ефективність системи освітлення.

Література

1. Кнорринг Г. М. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Кнорринг Г. М., Фадин И. М., Сидоров В. Н. – СПб : Энергоатомиздат, 1992. – 448 с.
2. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. – М. : Знак, 2006. – 972 с.
3. Кнорринг Г.М. Светотехнические расчёты в установках искусственного освещения / Г. М. Кнорринг. – Л. : Энергия, 1973. – 199 с.
4. Основы формирования углового распределения силы света [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.led-e.ru/articles/led-manufacture/2010_2_42.php (дата звернення 19.05.2015).
5. Бабенко О. В. Автоматичне керування освітленням [Електронний ресурс] / О. В. Бабенко, А. В. Гадай, О. М. Захарчук // Наукові праці ВНТУ – 2013. – № 1.
6. Бабенко О. В. Підвищення швидкодії застосування точкового методу під час розрахунку системи освітлення з круглосиметричними світильниками / О. В. Бабенко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах . – 2014. – № 2. – С. 50–54.
7. Бабенко О. В. Метод перехресної перевірки результатів оцінювання освітлювального навантаження під час проведення енергетичного аудиту виробничих приміщень [Електронний ресурс] / О. В. Бабенко, В. В. Захаров, Д. Л. Ферфецький // Наукові праці ВНТУ. – 2014. – № 2.
8. Бабенко О. В. Наближений метод побудови кривої сили світла світильників вуличного освітлення / О. В. Бабенко, В. В. Захаров, А. А. Видмиш // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 2. – С. 38–42.
9. Методичні вказівки та практичні завдання до виконання контрольних робіт з дисципліни "Економетрія" / Уклад. А.О. Азарова, Н.В. Сачанюк-Кавецька. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 60 с.

References

1. Knorring G. M. Spravochnaya kniga dlya proektirovaniya elektricheskogo osvvesheniya / Knorring G. M., Fadin I. M., Sidorov V. N. – SPb : Energoatomizdat, 1992. – 448 s.
2. Spravochnaya kniga po svetotekhnike / pod red. YU. B. Ayzemberga. – M. : Znak, 2006. – 972 s.
3. Knorring G.M. Svetotekhnicheskie rascheti v ustanovkah iskusstvennogo osvvesheniya / G. M. Knorring. – L. : Energiya, 1973. – 199 s.
4. Osnovy formirovaniya uglovogo raspredeleniya silyi sveta [Elektronniy resurs]. – Rejim dostupu : http://www.led-e.ru/articles/led-manufacture/2010_2_42.php (data zvernennya 19.05.2015). — Nazva z ekrana.
5. Babenko O. V. Avtomatichne keruvannya osvvlenniam [Elektronniy resurs] / O. V. Babenko, A. V. Hadai, O.M. Zakharchuk // Naukovi pratsi VNTU – 2013. – № 1.
6. Babenko O. V. Pidvyshchennia shvydkodii zastosuvannia tochkovoho metodu pid chas rozrakhunku systemy osvvlennia z kruhlosymetrychnymy svitylnykamy / O. V. Babenko // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh . – 2014. – № 2. – S. 50–54.
7. Babenko O. V. Metod perekhresnoi perevirky rezultativ otsiniuvannia osvvitliuvalnogo navantazhennia pid chas provedennia enerhetychnoho audytu vyrobnychkykh prymishchen [Elektronniy resurs] / O. V. Babenko, V. V. Zakharov, D. L. Ferfetskyi // Naukovi pratsi VNTU. – 2014. – № 2.
8. Babenko O. V. Nablyzheniy metod pobudovy kryvoi syly svitla svitylnykv vulychnoho osvvlennia / O. V. Babenko, V. V. Zakharov, A. A. Vydmysh // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2015. – № 2. – S. 38–42.
9. Metodychni vkazivky ta praktychni zavdannia do vykonannia kontrolnykh robot z dystsypliny "Ekonometriia" / Uklad. A.O. Azarova, N.V. Sachaniuk-Kavetska. – Vinnytsia : VNTU, 2004. – 60 s.

Рецензія/Peer review : 24.11.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.12.2018 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Матвійчук В.А.