



УДК 631.22: 628.8

DOI: 10.37128/2520-6168-2020-4-15

**МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ОПТИЧНОГО
СПЕКТРУ НА РІВНІ ЛИСТА РОСЛИНИ****Червінський Леонід Степанович**, д.т.н., професор**Книжка Тетяна Сергіївна**, к.т.н., доцент**Романенко Олексій Іванович**, к.т.н., ст. викладачІнститут енергетики, автоматики та енергозбереження
Національного університету біоресурсів і природокористування**Chervinsky Leonid**, Doctor of Technical Sciences, Professor,**Knizhka Tetiana**, Ph.D., Associate Professor**Romanenko Oleksii**, Ph.D., Art. LecturerDepartment of Electrical Engineering, Electromechanics and Electrical Technologies of the
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Низький рівень природної освітленості в теплицях і короткий зимовий день потребує додаткового опромінення, та штучного підтримання температурного режиму і вологості, за рахунок значних витрат невідновлюваної енергії. Відомо, що біля половини собівартості продукції припадає на електроенергію. Тому державного рівня набувають питання збереження електроенергії, яка витрачається на освітлення приміщень та опромінення рослин. Одним із шляхів зниження витрат електроенергії на світлокультуру рослин є вдосконалення методів розрахунку фотосинтезного опромінення з подальшим автоматичним підтриманням ефективного рівня опроміненості.

Одним із шляхів зниження витрат електроенергії на світлокультуру рослин в спорудах захищеного ґрунту та підвищення їх продуктивності є вдосконалення методів визначення та підтримання оптимальних величин освітленості випромінюванням заданого спектру, яке забезпечить найбільш ефективний рівень фотосинтезного процесу розвитку рослини з подальшим збільшенням її продуктивності. В наведеній статті проведено моделювання електромагнітного поля оптичного спектру на рівні формування листа рослини, в якому враховується розсіяне випромінювання та відбите поверхнями стін і стелі. Запропонований метод підвищує точність визначення фактичного значення опроміненості за рахунок урахування особливостей яскравості покриття на стінах і стелі та коефіцієнту їх відбиття як функції просторових координат.

Наведено приклад використання даного методу для визначення та автоматичного підтримання фактичної фотосинтезної опроміненості у відповідності до нормативного значення інтенсивності світла у виробничому приміщенні теплиці, який забезпечує ефективний розвиток рослини і, відповідно, максимальну продуктивність.

Ключові слова: електромагнітне поле, продуктивність рослини, фотосинтезна опроміненість, моделювання, теплиця.

Ф. 8. Рис. 4. Літ. 9

1. Постановка проблеми

Пропонується розробка математичної моделі, який дозволяє підвищити точність розрахунку фотосинтезної опроміненості на рівні листа рослини з урахуванням інтенсивності відбитого та розсіяного випромінювання для конкретних типів світильників в спорудах захищеного ґрунту.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

При розрахунку освітленості та опроміненості у виробничих приміщеннях у нашій країні найбільш поширеними є методи коефіцієнта використання світлового потоку (КВСП), точковий метод (ТМ) та метод питомої потужності (МПП). Ці апробовані методи мають ряд недоліків. Метод КВСП дає опосередковане значення освітленості (опроміненості) лише на горизонтальній робочій поверхні; ТМ не враховує відбиття потоку оптичного випромінювання від стін і стелі; МПП використовується для наближених розрахунків[6].



Існують більш досконалі сучасні методи розрахунку освітлення в програмних середовищах DIALux, Relux Professional, Lightscape, Calculux і EUROPIC [2,4]. Загальним недоліком даних комп'ютерних програм є відсутність зручних засобів роботи з фотометричними характеристиками стін, стелі приміщення та світильників (опромінювачів). Для кожного проекту необхідно створювати базу даних щодо застосованих світильників, що ускладнює і уповільнює роботу.

3. Основні результати дослідження

Розглянемо фрагмент виробничого приміщення теплиці, довжина якого X , ширина – Y (фрагмент такого приміщення наведений на рис.1).

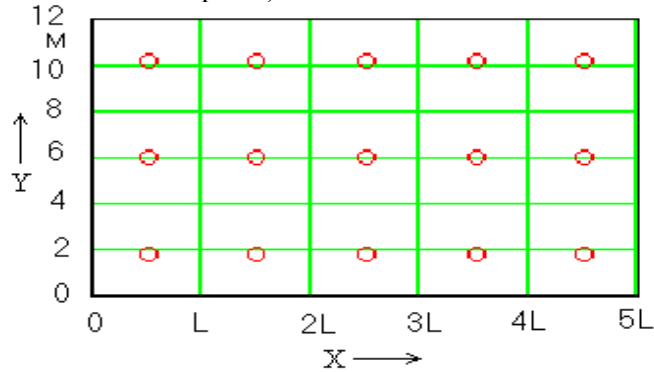


Рис. 1. Фрагмент плану теплиці зі світильниками
(L – відстань між світильниками, м.)

На практиці для створення загального рівномірного опромінення, як правило, використовують світильники з косинусною кривою сили світла, для яких значення найвигіднішої відносної відстані λ між світильниками рекомендується $\lambda=1,4 \dots 1,6$ [6]. Пропонується розглядати стіни і стелю як додаткові дифузно випромінюючі джерела нерівномірної яскравості. Тоді опроміненість на будь якій точці розрахункової поверхні можна визначити як суму опроміненостей, утворених прямим випромінюванням світильників і відбитим від стін і стелі за виразом:

$$E(x,y) = E_{св}(x,y) + E_{стін}(x,y) + E_{стелі}(x,y), \quad (1)$$

де $E_{св}$ – опроміненість, утворена прямим фотосинтезним потоком світильників; $E_{стін}$ – опроміненість, утворена відбитим від стін фотосинтезним потоком; $E_{стелі}$ – опроміненість, утворена фотосинтезним потоком, відбитим від стелі між світильниками.

Розглядаючи світильники як точкові джерела, опроміненість у точці на розрахунковій поверхні, яка утворена прямим випромінюванням світильників, розрахуємо за відомою формулою [6]

$$E = \frac{F}{1000} \cdot \sum_n \frac{I_{\alpha_n} \cos^3 \alpha_n}{H_p^2}, \quad (2)$$

де F – фотосинтезний потік лампи, фіт; I_{α} – сила фотосинтезного випромінювання в напрямку опромінюваної точки на поверхні листа рослини, фіт/ср; α – кут між перпендикулярною віссю світильника і лінією, яка з'єднує світловий центр світильника з точкою на опромінюваній поверхні; H_p – перпендикулярна відстань від світильників до розрахункової поверхні, м.

Визначивши $\cos \alpha_n$ через координати розташування опромінюваної точки та n -ного світильника, отримаємо

$$E_{св}(x,y) = \frac{F}{1000} \sum_n \left[\frac{Z_n \cdot I_{\alpha_n}}{\sqrt{Z_n^2 + (x - X_n)^2 + (y - Y_n)^2}^3} \cdot \left[\arccos \left[\frac{Z_n}{\sqrt{Z_n^2 + (x - X_n)^2 + (y - Y_n)^2}} \right] \right] \right], \quad (3)$$

де X_n, Y_n, Z_n – координати розташування n -го світильника у вибраній системі координат; x, y – поточні горизонтальні координати опромінюваної точки на поверхні листка рослини.

Задаючись координатами світильників, фотосинтезним потоком лампи, здійснивши сплайн-інтерполяцію (в середовищі Mathcad) залежності сили світла I_{α} від кута α , за формулою (3) отримаємо картину ізофіт, утворену прямим фотосинтезним потоком від світильників в площині опромінюваної теплиці на заданому рівні листа рослин (рис.2).

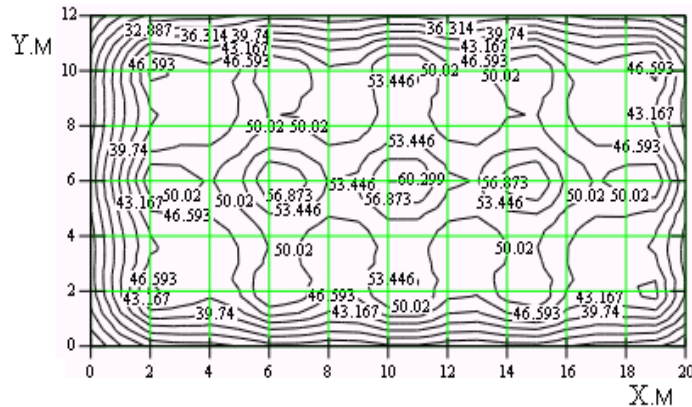


Рис.2. Фрагмент ізолікс утворених прямим фотосинтезним потоком на розрахунковій поверхні при висоті розміщення світильників $Z=3$ м, $F=1350$ фіт.

Для того, щоб представити стіну, як дифузне джерело відбитого випромінювання, визначимо пряму опроміненість на поверхні стіни - $E_c(x, z)$ за аналогічно побудованою формулою

$$E_c(x, z) = \left[\sum_n \left[\frac{Y_n}{\sqrt{(z - Z_n)^2 + (x - X_n)^2 + Y_n^2}} \right]^3 \cdot \frac{F \cdot I_{a_n}}{Y_n^2 \cdot 1000} \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \arccos \left[\frac{Y_n}{\sqrt{(z - Z_n)^2 + (x - X_n)^2 + Y_n^2}} \right] \right] \right]. \quad (4)$$

При рівномірному розташуванні світильників, картина ізопіт на 75% поверхні стіни складається з ділянок, які повторюються з кроком, рівним відстані між світильниками (рис.3).

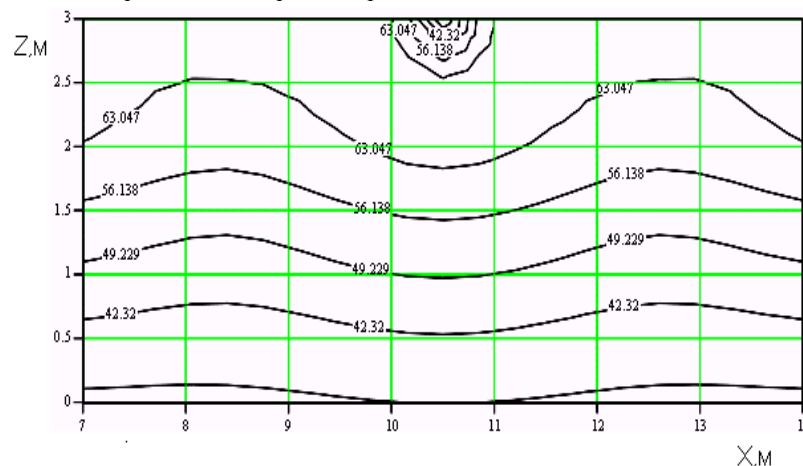


Рис.3. Фрагмент поля ізопіт утворених фотосинтезним потоком від світильників на поверхні стіни.

Приймаючи, що яскравість стіни складається з ряду горизонтальних, рівномірно-яскравих прямокутних зон, опроміненість - $E_m(x, y)$ від кожної з них у точці на горизонтальній розрахунковій поверхні можна визначити, використовуючи вираз Хігбі-Левіна [3], за формулою

$$E_m(x, y) = \frac{E_{c_m} R_c}{\pi} \int_{h_m}^{h_{m+1}} \int_0^{5L} \frac{z \cdot \sqrt{(X - x)^2 + y^2}}{[(X - x)^2 + y^2 + z^2]^2} dz dx, \quad (5)$$

де E_{c_m} – середня опроміненість m -ї прямокутної зони на поверхні стіни, фіт/м²; R_c – коефіцієнт відбиття даної зони стіни.

Тоді опроміненість на горизонтальній розрахунковій поверхні, утворену відбитим від стіни фотосинтезним потоком, можна визначити за формулою

$$E_{c_{\text{min}}}(x, y) = \sum_m E_m(x, y). \quad (6)$$



У загальному випадку опроміненість та коефіцієнт відбиття стіни є функціями координат – $E_c(x,z)$, $R_c(x,z)$. Тому, опроміненість розрахункової поверхні, утворену потоком від поверхні стіни, розрахуємо за формулою

$$E_{\text{стіни}}(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_0^H \int_0^{5L} \frac{R_c(x, z) E_c(x, z) z \sqrt{(X-x)^2 + y^2}}{\left[(X-x)^2 + y^2 + z^2 \right]^{3/2}} dz dx, \quad (7)$$

де H – відстань від стелі до розрахункової поверхні, м; $5L$ – довжина ділянки горизонтальної поверхні, на якій розраховується опроміненість від стіни, м.

Опроміненість розрахункової поверхні на рівні листа рослини, утворену відбитим від стелі випромінюванням, розрахуємо аналогічно:

$$E_{\text{стелі}}(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_0^B \int_0^{5L} \frac{R_{cm}(x, y) E_{cm}(x, z) H^2}{\left[(X-x)^2 + (Y-y)^2 + H^2 \right]^{3/2}} dx dy, \quad (8)$$

де $R_{cm}(x, y)$ – коефіцієнт відбиття фотосинтезного потоку від стелі; B – ширина приміщення, м; $5L$ – довжина розрахункової ділянки, м.

Аналіз отриманих результатів.

Сумарні результати обчислення фотосинтезної опроміненості на горизонтальній розрахунковій поверхні даним методом за виразом (1) у вигляді ізофот наведені на рис.4.

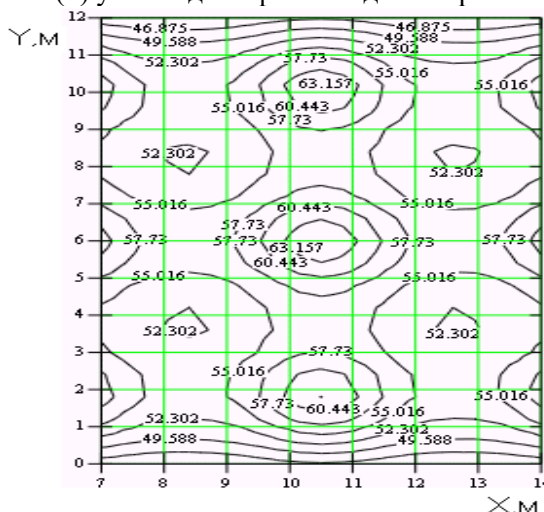


Рис.4. Ізофоти розподілу сумарної фотосинтезної опроміненості на розрахунковій горизонтальній поверхні.

Із рис. 4 видно, що розподіл опроміненості на заданому рівні залежить від світлорозподілу світильників, відстані між ними та фітотвідибляючих властивостей покриття стін і стелі в теплиці.

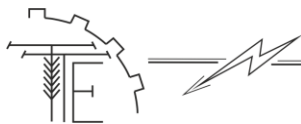
4. Висновки

1. Запропонований метод підвищує точність визначення фактичного значення опроміненості за рахунок урахування особливостей розподілу яскравості на стінах і стелі та коефіцієнту їх відбиття як функції просторових координат.

2. Встановлено, що використання даного методу, в порівнянні з ТМ та КВСП, при проектуванні опромінювальних систем в спорудах захищеного ґрунту забезпечить зменшення витрат електроенергії до 17...24 відсотків та надасть можливість більш ефективного автоматичного регулювання заданого рівня фотосинтезної опроміненості.

Список використаних джерел

1. Вергунов В. А., Вергунова И. Н., Шкрабак В. С.. Основы математического моделирования: Для анализа и прогноза агрономич. Процессов. СПб. : СПбГАУ, 2003. 219с.
2. Дехоф П., Земборт Д. Автоматизированное проектирование внутреннего освещения. Светотехника. 1994. № 2. С. 3–5.
3. Дж. Эмбрехт. Аналитическое решение простой задачи искусственного освещения для тестирования программ расчета освещения. Светотехника. 1998. №5. С. 15–18.



4. Крюгер Х., Фляйтер С., Ширц К. Новые подходы к совместному проектированию естественного и искусственного света. Светотехника. 1999. № 3. С. 15–17.
5. Тихомиров А. А., Шарупич В. П., Лисовский Г. М. Светокультура растений. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. 321с.
6. Червінський Л. С., Сторожук Л. О. Електричне освітлення та опромінення. Київ: Видавництво «Аграр Медіа Груп», 2011. 214с.
7. Червінський Л. С., Усенко С. М., Книжка Т. С., Луцак Я. М. Метод визначення просторової фотосинтезної опроміненості. Технічна електродинаміка. Інст. Електродинаміки НАН України, м.Київ. 2016. №5. С. 88–90.
8. Матвійчук В. А., Рубаненко О. Є., Стаднійчук І. П. Електротехнології в АПК: навчальний посібник. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2020. 272 с.
9. Chervinsky L., Storozhuk L., Pashkovska N. Influence of Infrared Radiation on Sowing Quality and Growth Indicators of Winter Wheat Plants. Korean Journal of Food & Health Convergence. 2020. 6(1), pp.15–18. <http://www.kjfhc.or.kr/> doi: <http://dx.doi.org/10.13106/kjfhc.2020.vol6.no1.15>.

References

- [1] Vergunov, V. A., Vergunova, I. N., Shkrabak, V. S. (2003). Osnovy matematicheskogo modelirovaniya: Dlya analiza i prognoza agronomich. Protseessov. SPb. : SPbGAU. [in Russian]
- [2] Dekhof, P., Zembort, D. (1994). Avtomatizirovannoye proyektirovaniye vnutrennego osveshcheniya. Svetotekhnika, 2. 3–5. [in Russian]
- [3] Embrekht, Dzh. (1998). Analiticheskoye resheniye prostoy zadachi iskusstvennogo osveshcheniya dlya testirovaniya programm rascheta osveshcheniya. Svetotekhnika, 5. 15–18. [in Russian]
- [4] Kryuger, Kh., Flyayter, S., Shirts, K. (1999). Novyye podkhody k sovmestnomu proyektirovaniyu estestvennogo i iskusstvennogo sveta. Svetotekhnika, 3. 15–17. [in Russian]
- [5] Tikhomirov, A. A., Sharupich, V. P., Lisovskiy, G. M. (2000). Svetokultura rasteniy. Novosibirsk: Izdatelstvo SO RAN. [in Russian]
- [6] Chervinskyi, L.S., Storozhuk, L. O. (2011). Elektrychne osvittlenня ta oprominennia. Kyiv: Vydavnytstvo «Ahrar Media Hrup». [in Ukrainian]
- [7] Chervinskyi, L.S., Usenko, S.M., Knyzhka, T.S., Lutsak, Ya.M. (2016). Metod vyznachennia prostorovoi fotosynteznoi oprominenosti. Tekhnichna elektrodynamika. Inst. Elektrodynamiky NAN Ukrainy, m.Kyiv, 5. 88–90. [in Ukrainian]
- [8] Matviichuk, V.A., Rubanenko, O.Ye., Stadniichuk, I.P. (2020). Elektrotekhnolohii v APK: navchalnyi posibnyk. Vinnytsia: TOV «TVORY». [in Ukrainian]
- [9] Chervinsky, L., Storozhuk, L., Pashkovska, N. (2020). Influence of Infrared Radiation on Sowing Quality and Growth Indicators of Winter Wheat Plants. Korean Journal of Food & Health Convergence, 6(1), 15–18. <http://www.kjfhc.or.kr/> doi: <http://dx.doi.org/10.13106/kjfhc.2020.vol6.no1.15>. [in English]

MODELING OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD OF THE OPTICAL SPECTRUM AT THE LEAVE OF THE PLANT

Low levels of natural light in greenhouses and a short winter day require additional irradiation, and artificial maintenance of temperature and humidity, due to the significant cost of non-renewable energy. It is known that about half of the cost of production is accounted for by electricity. Therefore, the state level is gaining issues of conservation of electricity spent on lighting and irradiation of plants. One of the ways to reduce the cost of electricity for light crops is to improve the methods of calculating photosynthetic irradiation, followed by automatic maintenance of the effective level of irradiation.

One of the ways to reduce energy consumption for photoculture of plants in protected ground structures and increase their productivity is to improve methods for determining and maintaining optimal illumination values with radiation of a given range, which will provide the most effective level of photosynthetic process of plant development with a subsequent increase in its productivity. In the given article, the modeling of the electromagnetic field of the optical spectrum at the level of plant leaf formation, which takes into account the scattered radiation and reflected by the surfaces of the walls and ceiling, is carried out. The proposed method increases the accuracy of determining the actual value of irradiance by taking into account the features of the brightness of the coating on the walls and ceiling and their reflection coefficient as a function of spatial coordinates.

An example is given of using this method to determine and automatically maintain the actual photosynthetic irradiation in accordance with the standard value of light intensity in the production room of the greenhouse, which ensures effective plant development and, accordingly, maximum productivity.

Key words: Electromagnetic field, plant productivity, photosynthetic irradiation, modeling, greenhouse.

F. 8. Fig. 4. Ref. 9.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА НА УРОВНЕ ЛИСТЬЯ РАСТЕНИЯ**

Низкий уровень естественной освещенности в теплицах и короткий зимний день требует дополнительного облучения, и искусственного поддержания температурного режима и влажности, за счет значительных затрат невозобновляемой энергии. Известно, что около половины себестоимости продукции приходится на электроэнергию. Поэтому государственного уровня приобретают вопросы сохранения электроэнергии, расходуемой на освещение помещений и облучения растений. Одним из путей снижения затрат электроэнергии на светокультуры растений является совершенствование методов расчета фотосинтезного облучения с последующим автоматическим поддержанием эффективного уровня облученности.

Одним из путей снижения затрат электроэнергии на светокультуры растений в сооружениях защищенного грунта и повышение их производительности является совершенствование методов определения и поддержания оптимальных величин освещенности излучением заданного диапазона, которое обеспечит наиболее эффективный уровень фотосинтезного процесса развития растения с последующим увеличением его производительности. В приведенной статье проведено моделирование электромагнитного поля оптического спектра на уровне формирования листа растения, в котором учитывается рассеянное излучение и отраженное поверхностями стен и потолка. Предложенный метод повышает точность определения фактического значения облученности за счет учета особенностей яркости покрытия на стенах и потолке и коэффициента их отражение как функции пространственных координат.

Приведен пример использования данного метода для определения и автоматического поддержания фактической фотосинтезной облученности в соответствии с нормативного значения интенсивности света в производственном помещении теплицы, который обеспечивает эффективное развитие растения и, соответственно, максимальную производительность.

Ключевые слова: электромагнитное поле, продуктивность растения, фотосинтезная облученность, моделирование, теплица

Ф. 8. Рис. 4. Лит. 9.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Червінський Леонід Степанович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри "Електротехніки, електромеханіки та електротехнологій" Національного університету біоресурсів і природокористування України (вул. Героїв оборони 12, м. Київ, 031041, Україна, e-mail: lchervinsky@gmail.com)

Книжка Тетяна Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Електротехніки, електромеханіки та електротехнологій" Національного університету біоресурсів і природокористування України (вул. Героїв оборони 12, м. Київ, 031041, Україна)

Романенко Олексій Іванович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри "Електротехніки, електромеханіки та електротехнологій" Національного університету біоресурсів і природокористування України (вул. Героїв оборони 12, м. Київ, 031041, Україна)

Червинский Леонид Степанович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Электротехника, электромеханика и электротехнологий" Национального университета биоресурсов и природопользования Украины (ул. Героев обороны 12 м. Киев, 031041, Украина, e-mail: lchervinsky@gmail.com)

Книжка Татьяна Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры "Электротехника, электромеханика и электротехнологий" Национального университета биоресурсов и природопользования Украины (ул. Героев обороны 12 м. Киев, 031041, Украина)

Романенко Алексей Иванович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры "Электротехника, электромеханика и электротехнологий" Национального университета биоресурсов и природопользования Украины (ул. Героев обороны 12 м. Киев, 031041, Украина)

Chervinsky Leonid – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering, Electromechanics and Electrical Technologies of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (12 Heroiv Oborony St., Kyiv, 031041, Ukraine, e-mail: lchervinsky@gmail.com)

Knizhka Tetiana – Ph.D., Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Electromechanics and Electrical Technologies of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (12 Heroiv Oborony St., Kyiv, 031041, Ukraine)

Romanenko Oleksii – Ph.D., Art. Lecturer at the Department of Electrical Engineering, Electromechanics and Electrical Technologies of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (12 Heroiv Oborony St., Kyiv, 031041, Ukraine)