

**II. ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ПЕРЕРОБНИХ ТА ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

УДК 621.359.6

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ  
ЕЛЕКТРОПАСТЕРИЗАТОРА МОЛОКА З ІНФРАЧЕРВОНИМ ВИПРОМІНЮВАЧЕМ****Котов Борис Іванович**, д.т.н., професор

Подільський державний аграрно-технічний університет,

**Грищенко Володимир Олександрович**, к.т.н., старший викладач

Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Панцир Юрій Іванович**, к.т.н., доцент**Герасимчук Ігор Дмитрович**, к.т.н., доцент

Подільський аграрно-технічний університет

**B. Kotov**, Doctor of Technical Sciences, Full Professor

Podilsky State Agrarian University of Technology

**V. Grischenko**, PhD, Senior Lecturer

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

**Yu. Pantsyr**, PhD, Associate Professor**I. Herasymchuk**, PhD, Associate Professor

Podolsky Agrarian and Technical University

*Розроблено математичний опис динамічного температурного режиму електропастеризатора молока проточного типу з інфрачервоним випромінювачем. Математичний опис динамічних режимів такої установки складено на основі рівнянь теплового балансу виходячи з таких теплофізичних послань: потужність, що виділяється у тілі розжарювання витрачається на збільшення його температури і частково передається шляхом конвективного теплообміну та випромінюванням до внутрішньої поверхні трубки, а також випромінюванням до молока, яке рухається у міжтрубному просторі. Отримано структурну схему математичної моделі динаміки пастеризатора і передатні функції окремих елементів ланок установки.*

*Ключові слова: пастеризатор, ІЧ-випромінювач, молоко, температурний режим.*

*Ф. 15. Рис. 2. Літ. 4.*

---

**1. Постановка проблеми**

Для отримання молока належної якості недостатньо мати тільки устаткування первинної обробки. Для цього необхідно мати пастеризаційно-охолоджувальну установку, яка забезпечує не тільки продовження терміну зберігання продукту, але й знезаражування молока. Існуючі пастеризатори засновані на використанні теплової енергії парового котла, мають значну металоємність, низький ККД і значні труднощі автоматизації температурного режиму. На сьогодні для отримання бактерицидного ефекту знайшов своє застосування спосіб пастеризації молока інфрачервоним випромінюванням. Для автоматизації управління температурним режимом ІЧ-пастеризатора, що працює в проточному режимі необхідно мати математичний опис – динамічну модель проточного апарата з підводом енергії ІЧ-випромінюванням.

---

**2. Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Основи технології теплової обробки молока, в тому числі і пастеризації, визначені у роботі Мастакова Н.Н. [1, 2]. Необхідність і доцільність автоматизації пастеризатора з безпосереднім електричним нагрівом обґрунтовано у роботі Ковальова В.О. [3]. Обґрунтування ефективності використання ІЧ-випромінювання дано у роботі Кунденко М.П. [4] та у його дисертації [5] наведено результати досліджень і розрахунок статистики процесу. Дослідження динамічних характеристик ІЧ-пастеризації залишилися поза увагою.

---

**3. Мета дослідження**

Створення математичної моделі ІЧ-пастеризатора і отримання аналітичних залежностей які характеризують динамічні властивості процесу нагріву і всього об'єкту управління.



#### 4. Результати дослідження

Розрахункова модель установки для теплової обробки молока ІЧ-випромінюванням являє собою об'єкт з чотирма теплоінерційними ємностями: тіло розжарювання (спіраль проволочна), трубка з кварцового скла (в якій розміщена спіраль), об'єм зайнятий молоком, яке рухається між трубками у корпусі і сам корпус з тепловою ізоляцією.

Математичний опис динамічних режимів такої установки (процесу, що відбувається) складемо на основі рівнянь теплового балансу виходячи з таких теплофізичних послань: потужність, що виділяється у тілі розжарювання витрачається на збільшення його температури і частково передається шляхом конвективного теплообміну та випромінюванням до внутрішньої поверхні трубки, а також випромінюванням до молока, яке рухається у міжтрубному просторі. Теплота, сприйнята поверхнею (тілом) трубки витрачається на нагрів самої трубки і від неї передається до молока конвективним теплообміном. Теплота, яка сприйнята молоком від випромінювача і трубки, витрачається на підвищення температури молока через зовнішню поверхню передається у навколишнє середовище і втрачається з молоком відведеним з апарата.

В основу рівнянь динаміки процесу покладено такі припущення: температура тіла розжарювання і трубки де вона розміщена, за довжиною не змінюється, а їх нагрів безградієнтний; тепловими втратами повітря, через стінку корпусу у зовнішнє середовище, нехтуємо (за наявності теплоізоляції); поверхня трубки приймається для середнього діаметру; теплофізичні властивості молока, теплоємності матеріалів випромінювача та коефіцієнти теплопередачі в часі не змінюються і дорівнюють середнім за процес; температура випромінювача, апарата та молока у попередньому перетині однакові.

Для обраної фізичної моделі процесу з урахуванням наведених припущень складаємо наступні диференціальні рівняння:

- рівняння збереження енергії для тіла розжарювання:

$$P = m_w c_w \frac{\partial \theta_w}{\partial \tau} + c_{np1} F_1 (T_w^4 - T_{mp}^4) + \alpha_{k1} F_{mp} (\theta_w - \theta_{mp}) + c_{np2} F_2 (T_w^4 - T_m^4); \quad (1)$$

- рівняння збереження енергії для трубки:

$$A_{mp} c_{np1} F_1 (T_w^4 - T_{mp}^4) + \alpha_{k1} F_{mp} (\theta_w - \theta_{mp}) = m_{mp} c_{mp} \frac{\partial \theta_{mp}}{\partial \tau} + \alpha_{k2} F_{mp} (\theta_{mp} - \theta_m); \quad (2)$$

- рівняння збереження енергії для молока:

$$c_{np2} F_1 (T_w^4 - T_m^4) A_m + \alpha_{k2} F_{mp} (\theta_{mp} - \theta_m) = m_m c_m \frac{\partial \theta_m}{\partial \tau} + G c_m H \frac{\partial \theta_m}{\partial x}; \quad (3)$$

де  $c_{np}$  – приведені коефіцієнти випромінювання;

$T = (\theta + 273/100)$  – абсолютна температура, °К;

$\alpha_{k1}, \alpha_{k2}$  – коефіцієнти теплообміну повітря з трубкою і трубки з молоком, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$F_1, F_2$  – поверхня випромінювання і трубки, м<sup>2</sup>;

$m_w, m_{mp}, m_m$  – маса тіла розжарювання, трубки і молока в об'ємі апарата, кг;

$G$  – витрати молока, кг/с;

$H$  – висота апарата, м;

$c_w, c_{mp}, c_m$  – питома теплоємність матеріалів спіралі, трубки і молока, Дж/(кг·°С);

$A_{mp}, A_m$  – коефіцієнти поглинання ІЧ – випромінювання склом і молоком;

$\tau$  – час, с;

$x$  – координата напрямку руху, м.

Отримана система нелінійних диференціальних рівнянь (1) – (3) описує динамічні характеристики процесу теплової обробки молока ІЧ-випромінюванням при таких початкових

умовах:  $\tau = 0, \theta_w = \theta_{w0}, \theta_m = \theta_{m10}, \frac{d\theta_w}{d\tau} = \frac{d\theta_{mp}}{d\tau} = \frac{d\theta_m}{d\tau} = 0$ .

Оскільки дана система рівнянь аналітичного розв'язку не має, введемо додаткові спрощення, лінеаризуючи математичний опис.



1. Використовуємо поняття лінійного коефіцієнта теплообміну випромінюванням і зробимо заміну:

$$c_{np}F(T_1^4 - T_2^4) = \alpha_l F(\theta_1 - \theta_2), \quad (4)$$

де  $\alpha_l = 5.67c_{np}(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$  – лінійний коефіцієнт теплообміну випромінюванням, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);

Тоді інтенсивність теплообміну можна представити як сумарну: конвективну і радіаційну:

$$q = \alpha_k(\theta_1 - \theta_2) + \alpha_l(\theta_1 - \theta_2) = (\alpha_k + \alpha_l)(\theta_1 - \theta_2) = \alpha_{kl}(\theta_1 - \theta_2); \quad (5)$$

2. Оскільки довжина випромінювачів незначна (до 0.6 м), а потоки молока інтенсивно їх омивають, можна вважати що відстань, яку проходить молоко дорівнює відстані від входу до виходу, тобто  $H$ ; тоді можна градієнт температури представити в кінцевих значеннях:

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\Delta \theta}{\Delta x} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{H}. \quad (6)$$

Використовуючи значення параметрів (4) і (5) в рівняннях (1) – (3) будемо мати лінійну систему рівнянь, що описує процес теплової обробки:

$$m_w c_w \frac{d\theta_w}{d\tau} = P_n + \alpha_{кл} F_{mp} \theta_{mp} + 0.5\alpha_l F_1 \bar{\theta}_m - \theta_w (\alpha_{кл} F_{mp} + \alpha_l F_1); \quad (7)$$

$$m_{mp} c_{mp} \frac{d\theta_{mp}}{d\tau} = \theta_w (A_1 \alpha_{кл} F_1 + \alpha_{k1} F_{mp}) - \theta_{mp} (\alpha_{k1} F_{mp} + \alpha_{k2} F_{mp}) - \alpha_{k2} F_2 \bar{\theta}_m; \quad (8)$$

$$m_m c_m \frac{d\theta_{m2}}{d\tau} = G_m c_m (\theta_{m1} - \theta_{m2}) + \alpha_{k2} F_2 (\theta_{mp} - \bar{\theta}_m) + \alpha_l F_1 A_m (\theta_w - \theta_m); \quad (9)$$

де  $\bar{\theta}_m = 0.5(\theta_{m1} + \theta_{m2})$ ;  $\theta_{m1}, \theta_{m2}$  – температура молока на вході і виході.

Подання математичного опису динаміки теплової обробки молока ІЧ-випромінюванням передатними функціями.

У рівняннях (7) – (9) сталими параметрами є: маса і поверхня матеріалів та середовищ  $m_w c_w$ ,  $m_{mp} c_{mp}$ ,  $m_m c_m$ ; поверхні теплообміну  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_{mp}$ ; коефіцієнти теплообміну  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_l$ ; а змінними: температура випромінювача  $\theta_w$ , трубки  $\theta_{mp}$ , молока  $\theta_{m1}$  і  $\theta_{m2}$ , а також витрата молока  $G$  (продуктивність апарата).

Запишемо змінні параметри об'єкта у приростах:  $\theta_w = \theta_{w0} + \Delta\theta_w$ ,  $\theta_{mp} = \theta_{mp0} + \Delta\theta_{mp}$ ,  $\theta_{m1} = \theta_{m10} + \Delta\theta_{m1}$ ,  $\theta_{m2} = \theta_{m20} + \Delta\theta_{m2}$ ,  $G = G_0 + \Delta G$ .

Підставляючи значення змінних параметрів у рівняння (6) – (9), після множення, нехтуючи складовими малого ступеня і віднімання рівнянь статички будемо мати:

$$m_w c_w \frac{d\Delta\theta_w}{d\tau} + \Delta\theta_w = k_1 \Delta P + k_2 \Delta\theta_{mp} + k_3 \Delta\theta_{m1} + k_4 \Delta\theta_{m2}, \quad (10)$$

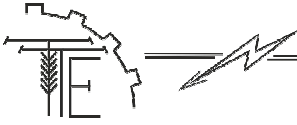
$$m_{mp} c_{mp} \frac{d\Delta\theta_{mp}}{d\tau} + \Delta\theta_{mp} = k_5 \Delta\theta_w + k_6 \Delta\theta_{m1} + k_7 \Delta\theta_{m2}, \quad (11)$$

$$m_m c_m \frac{d\Delta\theta_{m2}}{d\tau} + \Delta\theta_{m2} = k_8 \Delta\theta_{m1} + k_9 \Delta\theta_{mp} + k_{10} \Delta\theta_w. \quad (12)$$

У рівняннях (10) – (12) позначено:

$$T_1 = \frac{m_w c_w}{k_{01}}; k_{01} = k_{кл} F_{mp} + \alpha_l F_1; T_2 = \frac{m_{mp} c_{mp}}{k_{02}}; k_{02} = F_{mp} (\alpha_{k1} + \alpha_{k2}); T_3 = \frac{m_m c_m}{k_{03}};$$

$$k_{03} = G_m c_m + 0.5k_2 F_2 + 0.5\alpha_l F_1 A_m; k_1 = k_{01}^{-1}; k_2 = \frac{k_{кл} F_{mp}}{k_{01}}; k_3 = \frac{\alpha_{кл} \alpha_l F_1}{k_{01}}; k_4 = k_3;$$



$$k_5 = \frac{A_1 \alpha_{кл} F_1 + \alpha_{к1} F_{mp}}{k_{02}}; k_6 = k_7 = \frac{0.5 \alpha_{к2} F_2}{k_{02}}; k_8 = \frac{G_m c_m - 0.5 k_2 F_2 - 0.5 A_m \alpha_l F_1}{k_{03}};$$

$$k_9 = \frac{\alpha_{к2} F_2}{k_{03}}; k_{10} = \frac{\alpha_l F_1}{k_{03}}; k_{11} = \frac{c_m (\theta_{m1} - \theta_{m2})}{k_{03}}.$$

Застосовуючи до рівняння (9) – (10) перетворення Лапласа при нульових початкових умовах отримуємо систему рівнянь в операторній формі:

$$(T_1 p + 1) \Delta \theta_w(p) = k_1 \Delta P(p) + k_2 \Delta \theta_{mp}(p) + k_3 \Delta \theta_{m1}(p) + k_4 \Delta \theta_{m2}(p), \quad (13)$$

$$(T_2 p + 1) \Delta \theta_{mp}(p) = k_5 \Delta \theta_w(p) + k_6 \Delta \theta_{m1}(p) + k_7 \Delta \theta_{m2}(p), \quad (14)$$

$$(T_3 p + 1) \Delta \theta_{m2}(p) = k_8 \Delta \theta_{m1}(p) + k_9 \Delta \theta_{mp}(p) + k_{10} \Delta \theta_w(p) + k_{11} \Delta G(p). \quad (15)$$

$$(T_1 \cdot p + 1) \cdot \Delta \theta_w(P) = k_1 \cdot \Delta P(P) + k_2 \cdot \Delta \theta_{TP}(P) + k_3 \cdot \Delta \theta_{M1}(P) + k_4 \cdot \Delta \theta_{M2}(P),$$

З отриманих рівнянь (13) – (15) визначаємо передатні функції по каналах керування ( $\Delta \theta_{m2} - \Delta P$ ), ( $\Delta \theta_{m2} - \Delta G$ ) і по збуренню ( $\Delta \theta_{m1}$ ):

$$W_1(p) = \frac{\Delta \theta_w(p)}{\Delta P(p)} = \frac{k_1}{T_1 p + 1}; W_2(p) = \frac{\Delta \theta_w(p)}{\Delta \theta_{mp}(p)} = \frac{k_2}{T_1 p + 1}; W_3(p) = \frac{\Delta \theta_w(p)}{\Delta \theta_{m1}(p)} = \frac{k_3}{T_1 p + 1};$$

$$W_4(p) = \frac{\Delta \theta_w(p)}{\Delta \theta_{m2}(p)} = \frac{k_4}{T_1 p + 1}; W_5(p) = \frac{\Delta \theta_{mp}(p)}{\Delta \theta_w(p)} = \frac{k_5}{T_2 p + 1}; W_6(p) = \frac{\Delta \theta_{mp}(p)}{\Delta \theta_{m1}(p)} = \frac{k_6}{T_2 p + 1};$$

$$W_7(p) = \frac{\Delta \theta_{mp}(p)}{\Delta \theta_{m2}(p)} = \frac{k_7}{T_2 p + 1}; W_8(p) = \frac{\Delta \theta_{m2}(p)}{\Delta \theta_{m1}(p)} = \frac{k_8}{T_3 p + 1};$$

$$W_9(p) = \frac{\Delta \theta_{m2}(p)}{\Delta \theta_{mp}(p)} = \frac{k_9}{T_3 p + 1}; W_{10}(p) = \frac{\Delta \theta_{m2}(p)}{\Delta \theta_w(p)} = \frac{k_{10}}{T_3 p + 1};$$

$$W_{11}(p) = \frac{\Delta \theta_{m2}(p)}{\Delta G(p)} = \frac{k_{11}}{T_3 p + 1}.$$

На основі рівнянь (10) – (12) та визначених передавальних функцій отримуємо лінійну математичну модель динаміки теплової обробки молока ІЧ-опроміненням у вигляді структурної схеми (рис. 1).

Розв'язок системи рівнянь (7) – (9) в середовищі Mathcad показано на рис. 2 у вигляді кривої розігріву ІЧ-випромінювача, і нагрівання молока в проточному режимі.

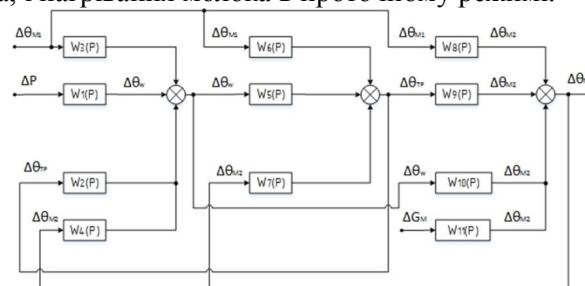


Рис. 1. Структурна схема лінійної моделі динаміки процесу теплової обробки молока ІЧ-опроміненням.

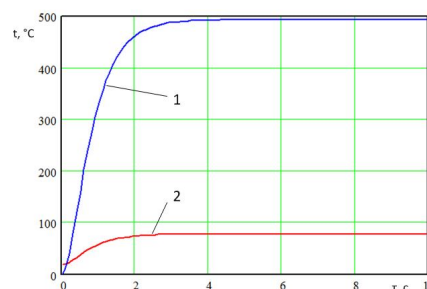
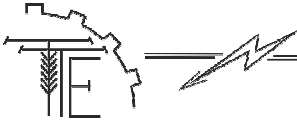


Рис. 2. Динаміка зміни температури випромінювача (1) та молока (2)

**4. Висновки**

1. Розроблено математичну модель динаміки теплових процесів пастеризатора молока безперервної дії із інфрачервоним випромінювачем.
2. Отримано аналітичні залежності, що характеризують динамічні властивості апарата.

**Список використаних джерел**

1. Мастаков Н.Н. Технология тепловой обработки молока: учеб. пособие [Текст] / Н.Н. Мастаков. – К.: Вища школа, 1990. – 167 с.
2. Янович В. П. Вібраційні гомогенізатори молока / В. П. Янович, К. О. Самойчук, Н. О. Паляничка, В. О. Верховланцева // Вібрації в техніці та технологіях. – 2018. – №1(88). – С. 77-82
3. Ковалев В.А. Автоматическое управление процессом пастеризации и обеззараживания молока в поточных установках с поверхностно- распределенными электронагревателями для молочно- товарных ферм: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.07 [Текст] / В. А. Ковалев. – Центральный НИИ механизации и электрификации сельского хозяйства Нечерноземной зоны СССР. – Минск, 1990. – 17 с.
4. Кунденко М. П. Розробка нового обладнання для теплової обробки молока [Текст] / М. П. Кунденко // Вісник ХДТУСГ. Проблеми енергозабезпечення в АПК України. – 2001.– №6. – С. 464–467.
5. Кунденко М. П. Удосконалення процесу та обладнання для пастеризації молока: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.18.12 [Текст] / М. П. Кунденко. – Харк. держ. акад. технології та орг. харчування. – Харків, 2002.– 17 с.

**References**

- [1] Mastakov, N.N. (1990). *Tekhnolohiya teplovoi obrabotky moloka [Technology of heat treatment of milk]*. Kyiv: Vyshcha shkola [in Russian].
- [2] Yanovych, V.P., Samoichuk, K. O., Palianychka, N. O., Verkhohlantseva V. O. (2018). *Vibratsiini homohenzatory moloka [Vibrating milk homogenizers]*. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibration in technology and technology*, №1(88), 77-82 [in Ukrainian].
- [3] Kovalev, V.A. (1990). *Avtomatycheskoe upravlenye protsessom pasteryzatsyy y obezzarazhyvaniya moloka v potochnykh ustanovkakh s poverkhnostno- raspredelemnymy elektronahrevateliamy dlia molochno- tovarnykh ferm [Automatic control of the process of pasteurization and disinfection of milk in flow plants with surface-distributed electric heaters for dairy farms]*. Tsentralnyi NYY mekhanizatsyy y elektryfikatsyy selskoho khoziaistva Nechernozemnoi zony SSSR. Mynsk [in Russian].
- [4] Kundenko, M.P. (2001). *Rozrobka novoho obladdnannia dlia teplovoi obrobky moloka [Scope of the new obladdnannya for the thermal milk box]*. Problemy enerhozabezpechennia v APK Ukrainy. [in Ukrainian].
- [5] Kundenko, M.P. (2002). *Udoskonalennia protsesu ta obladdnannia dlia pasteryzatsii moloka [Improvement of process and equipment for milk pasteurization]*. Khark. derzh. akad. tekhnolohii ta orh. kharchuvannia [in Ukrainian].

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ  
ЕЛЕКТРОПАСТЕРИЗАТОРА МОЛОКА С ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ**

*Разработано математическое описание динамического температурного режима электропастеризатора молока проточного типа с инфракрасным излучателем. Математическое описание динамических режимов такой установки составим на основе уравнений теплового баланса исходя из следующих теплофизических ссылок: мощность, выделяемая в теле накаливания расходуется на увеличение его температуры и частично передается путем конвективного теплообмена и излучением к внутренней поверхности трубки, а также излучением к молоку, которое движется в межтрубном пространстве. Получены структурную схему математической модели динамики пастеризационных и передаточные функции отдельных элементов звеньев установки.*

*Ключевые слова: пастеризатор, ИК-излучатель, молоко, температурный режим.*

**Ф. 15. Рис. 2. Лит. 4.**

**MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMIC MODES OF THE MILK  
ELECTROPASSERIZATOR WITH INFRARED DISTRIBUTOR**

*A mathematical description of the dynamic temperature regime of an electric pasteurizer of flow type milk with an infrared emitter has been developed. The mathematical description of the dynamic modes of such a installation will be made on the basis of the equations of the thermal balance based on the following thermophysical references: the power emitted in the body of the combustion is spent on increasing its temperature and partially transmitted by convective heat transfer and radiation to the inner surface of the tube, as well as radiation to milk, which moves in an intertubular space. The structural scheme of the mathematical model of the dynamics of the pasteurization and transfer functions of the individual elements of the installation units is obtained.*

**Keywords:** pasteurizer, infrared emitter, milk, temperature regime.

F. 15. Fig. 2. Ref. 4.

**ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ**

**Котов Борис Іванович** – доктор технічних наук, професор кафедри «Машиновикористання в АПК» Подільського державного аграрно-технічного університету (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, 32300, Україна, e-mail: eetsapk@pdatu.edu.ua).

**Грищенко Володимир Олександрович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка» Національного університету біоресурсів і природокористування України (вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна).

**Панцир Юрій Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, декан інженерно-технічного факультету Подільського аграрно-технічного університету (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька обл., 32300, Україна, e-mail: panziyuriy@gmail.com).

**Герасимчук Ігор Дмитрович** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Енергетики та електротехнічних систем в АПК» Подільського аграрно-технічного університету (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька обл., 32300, Україна, e-mail: igorgarasymchuk@gmail.com).

**Котов Борис Іванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиноиспользование в АПК» Подольского государственного аграрно-технического университета (ул. Шевченко, 13, г. Каменец-Подольский, 32300, Украина, e-mail: eetsapk@pdatu.edu.ua).

**Грищенко Владимир Александрович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматики и робототехнических систем им. акад. И.И. Мартыненко» Национального университета биоресурсов и природопользования Украины (ул. Героев Обороны, 15, г. Киев, 03041, Украина).

**Панцирь Юрий Иванович** – кандидат технических наук, доцент, декан инженерно-технического факультета Подольского аграрно-технического университета (ул. Шевченко, 13, г. Каменец-Подольский, Хмельницкая обл., 32300, Украина, e-mail: panziyuriy@gmail.com).

**Герасимчук Игорь Дмитрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Энергетики и электротехнических систем в АПК» Подольского аграрно-технического университета (ул. Шевченко, 13, г. Каменец-Подольский, Хмельницкая обл., 32300, Украина, e-mail: igorgarasymchuk@gmail.com).

**Kotov Boris** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor of the Chair "Machine-Use in the Agro-Industrial Complex" of the Podolsky State Agrarian and Technical University (Shevchenko St., 13, Kamenets-Podolsky, 32300, Ukraine, e-mail: eetsapk@pdatu.edu).

**Grishchenko Vladimir** – PhD, Senior lecturer of the department "Automation and Robotics Systems named after. acad. I.I. Martynenko" of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine (15, Geroev Oborony Street, Kiev, 03041, Ukraine).

**Pantsir Yuriy** – PhD, Associate Professor, Dean of the Faculty of Engineering and Technology of Podolsk Agrarian Technical University (Shevchenko St., 13, Kamyans-Podilsky, Khmelnytsky region, 32300, Ukraine, e-mail: panziyuriy@gmail.com).

**Gerasimchuk Igor** – PhD, Associate Professor, Head of the Department of "Energy and Electrical Systems in the Agro-Industrial Complex" of the Podolsky Agrarian Technical University (Shevchenko St., 13, Kamenets-Podolsky, Khmelnytsky region, 32300, Ukraine, e-mail: igorgarasymchuk@gmail.com).