

АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ ПРОЦЕСУ ВИПІКАННЯ ХЛІБОБУЛОЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ

В. В. КОЗИРСЬКИЙ, доктор технічних наук, професор
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*
В. В. МОМОТЮК, здобувач*
Мирогощанський аграрний коледж
e-mail: vika-v-m@ukr.net

Анотація. Для можливості оцінки ефективності процесу випікання хліба, дослідження статичних та динамічних режимів та їх впливу на показники роботи об'єкта введено математичну модель хлібопекарської печі за температурою. Для аналізу статичних і динамічних характеристик на базі отриманої математичної моделі складено структурну схему об'єкта управління. В рамках узгоджених припущень і обмежень сформовано критерій якості ідентифікації та доведено адекватність введеної математичної моделі об'єкта.

Ключові слова: *хлібопекарське виробництво, енергоефективність, система керування, імітаційне моделювання, критерій якості ідентифікації, середньоквадратична похибка моделювання*

На хлібопекарські печі припадає основна частина енергоспоживання на підприємствах хлібопекарської промисловості [1]. Тому, можливість за допомогою математичної моделі відносно швидко і всебічно досліджувати параметри роботи та властивості процесів випікання хліба в залежності від поставлених умов і мети без суттєвих витрат є досить актуальною задачею.

Випікання є заключним етапом технологічного процесу, під час якого тістова заготовка перетворюється у виріб, придатний для споживання. У процесі випікання збільшується об'єм тістової заготовки, зменшується її маса, формується об'єм виробів, закріплюється їх форма, утворюються скоринка і м'якушка, забарвлюється поверхня, формується смак і аромат [2].

Від правильності визначення моменту готовності хліба залежить його якість: товщина і окрас скоринки, властивості м'якушки, його еластичність та сухість на дотик. Проте кожна зайва хвилина знаходження хліба в печі збільшує його упікання, що суттєво впливає на вихід готового продукту та збільшує витрати палива.

Для вирішення питань енергозбереження за виробництв(і)а хлібобулочних виробів досить важливими є процеси теплообміну, які відбуваються в печах. Результати досліджень цих процесів актуальні в умовах

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор В. В. Козирський

вирішення питань регулювання і подачі теплоти з метою зменшення кількості палива, що споживається в хлібопекарських печах.

Деякий аналіз теплообмінних процесів у хлібопекарських печах, а також рекомендації щодо їх розрахунку наведені в роботах [3, 4, 5, 6], але ці рекомендації не дають можливості в цілому розрахувати процес випікання. Тобто, вони не дають можливості визначити температуру димових газів на виході з топки, температуру пароповітряного середовища в камері випікання, а також інші параметри.

Виходячи з наведеного вище, можна зробити висновок про те, що необхідно розробити математичну модель температурних режимів процесу випікання хлібобулочної продукції, яка б дала можливість:

- визначити температуру димових газів на виході з топки залежно від часу;
- визначити температуру димових газів на виході з топки залежно від витрати палива;
- визначити витрату палива залежно від температури паро повітряного середовища в камері випікання;
- розрахувати температуру пароповітряного середовища в камері випікання в заданий момент часу.

Мета досліджень – розробити математичну модель для можливості оцінки ефективності процесу випікання хліба, дослідження статичних та динамічних режимів та їх вплив на показники роботи хлібопекарської печі.

Матеріал і методика досліджень. На першому етапі для створення і дослідження системи керування процесом випікання хліба необхідно отримати лінійні математичні моделі процесу. Врахувати всі не стаціонарності в об'єкті неможливо, оскільки по-перше, неможливо побудувати математичну модель, яка буде враховувати всі можливі відхилення об'єкта, по-друге, математична модель, що враховує багато не стаціонарностей в об'єкті є досить громіздкою, що призводить до значного ускладнення побудови системи управління, а отже і до її реалізації.

Так як будь-яка хлібопекарська піч в структурному відношенні являє собою нелінійний багатомісний об'єкт з розподіленими параметрами і великою кількістю внутрішніх зворотніх зв'язків, то для отримання її математичної моделі, придатної для практичного використання, вводяться спрощуючі припущення. Піч розбивається на окремі, характерні в конструктивному відношенні, ділянки, кожна з яких розглядається як лінійний одномісний об'єкт з зосередженими параметрами і своїми вхідними та вихідними діями.

Хлібопекарську піч можна уявити як багатопараметричний одномісний об'єкт, який характеризується рядом технологічних і теплотехнічних величин. Параметрична схема печі за температурою представлена на рис. 1.

Можна виділити дві ємності: перша – ємність топки, друга – ємність камери випікання печі.

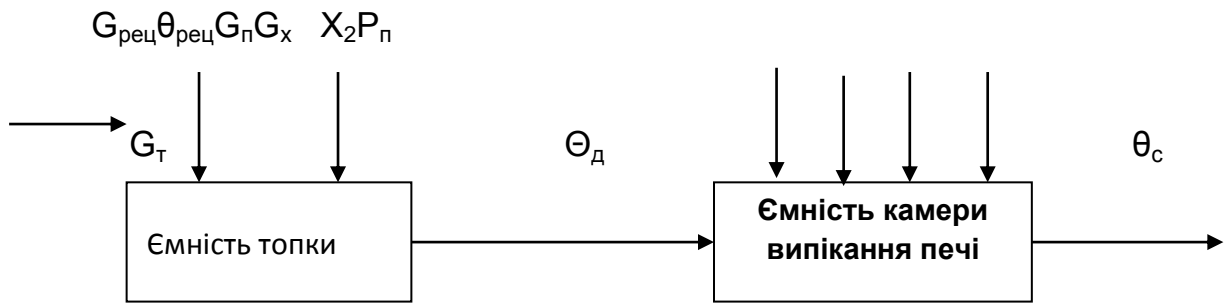


Рис. 1. Параметрична схема хлібопекарської печі за температурою

Проведемо аналітичний розрахунок статичних і динамічних характеристик для ємності топки. В усталеному режимі робота топки описується наступним рівнянням теплового балансу:

$$Q_n - Q_c = 0, \quad (1)$$

де Q_n – потужність теплового потоку, що надходить до топки, кВт;
 Q_c – потужність теплового потоку, що виходить з топки, кВт.
 В свою чергу:

$$Q_n = Q_x + Q_\phi + Q_\epsilon + Q_{pec}, \quad (2)$$

де Q_x – потужність теплового потоку, що надходить до топки за рахунок хімічної теплоти палива, кВт;

Q_ϕ – потужність теплового потоку, що надходить до топки за рахунок фізичної теплоти палива, кВт;

Q_ϵ – потужність теплового потоку, що надходить до топки з повітрям, кВт;

Q_{pec} – потужність теплового потоку, що надходить до топки з рециркуляційними газами, кВт.

Вхідними величинами для рівняння топки є: витрата палива G_m , що подається до топки витрата газів рециркуляції G_{pec} , що надходять до топки і температура газів рециркуляції θ_{pec} . Вихідною величиною, тобто регулюючим параметром даної ділянки, є температура димових газів θ_δ .

Рівняння динаміки для топки може бути одержане, якщо прийняти до уваги, що зміна температури димових газів в ній за час dt дорівнює різниці між кількістю теплоти в одиницях часу, що підводиться і кількістю теплоти в одиницях часу, що відводиться:

$$T_1 \frac{d(\Delta\theta_\delta)}{dt} + \Delta\theta_\delta = K_{11}\Delta G_m - K_{12}\Delta G_{pec} + K_{13}\Delta\theta_{pec}, \quad (3)$$

де K_{11}, K_{12}, K_{13} – коефіцієнти передачі топки;

T_1 – постійна часу топки.

Результати досліджень. Параметрична схема камери випікання печі як об'єкта регулювання температури θ_c , °C представлена на рис. 1.

Керуючою величиною прийнята θ_θ – температура димових газів на виході з топки, $^\circ\text{C}$, а величинами збурень – витрата пари G_n , кг/год; ступінь сухості пари X_2 ; потужність печі G_x , кг/год; середня температура середовища пекарної камери θ_k , $^\circ\text{C}$ та парціальний тиск пари в камері випікання P_n , кПа.

Приймаємо спрощуючі припущення: тепловідбір і тепловіддача металу конвейера приблизно рівні та взаємно компенсуються; втрати тепла в оточуюче середовище незначні; температура центра тістових заготовок в межах камери випікання не змінюється, а розподіл температур від центра до поверхні буде лінійним.

З урахуванням прийнятих позначень та припущень рівняння теплового балансу камери випікання печі в усталеному режимі має вигляд:

$$Q_n + Q_2 - Q_c - Q_m = 0, \quad (4)$$

де Q_n – притік тепла з насиченою парою;

Q_2 – притік тепла від гріючих поверхонь;

Q_c – тепло, що відноситься вентиляційною сумішшю в витяжний канал;

Q_m – тепло, що відноситься тістовими заготовками.

Підставляючи відомі залежності для складових рівняння теплового балансу, лінеаризуючи його та роблячи відповідні перетворення, отримуємо рівняння динаміки:

$$C_{zy} \frac{d\theta_c}{d\tau} = \sum Q_i, \quad (5)$$

де Q_i – доданки універсального рівняння балансу теплоти в статиці;

$C_{zy} = V_{zy} \cdot \rho_c \cdot C_c$ – теплоємність об'єкта як сума теплоємностей пароповітряного середовища і металу в межах камери випікання, кДж/К;

G_m – маса металу, кг;

ρ_c – густина середовища, кг/м³;

C_c, C_m – питома теплоємність відповідно середовища та металу, кДж/кг·К.

З урахуванням великої вологості пароповітряного середовища в камері випікання печі за умови розрахунку її теплоємності можна допустити, що густина середовища дорівнює густині пари, а питома теплоємність середовища – питомій теплоємності пари ($\rho_c = \rho_n, C_c = C_n$).

$$T_2 \frac{d(\Delta\theta_c)}{d\tau} + \Delta\theta_c = K_{21}\Delta G_n + K_{22}\Delta x_2 - K_{23}\Delta G_x + K_{24}\Delta\theta_\theta - K_{25}\Delta P_n, \quad (6)$$

де $K_{21}, K_{22}, K_{23}, K_{24}, K_{25}$ – коефіцієнти передачі камери випікання печі;

T_2 – постійна часу камери випікання печі.

Запишемо систему рівнянь, яка являє собою математичну модель хлібопекарської печі за температурою

$$\begin{cases} T_1 \frac{d(\Delta\theta_o)}{d\tau} + \Delta\theta_o = K_{11}\Delta G_m - K_{12}\Delta G_{peu} + K_{13}\Delta\theta_{peu} \\ T_2 \frac{d(\Delta\theta_c)}{d\tau} + \Delta\theta_c = K_{21}\Delta G_n + K_{22}\Delta x_2 - K_{23}\Delta G_x + K_{24}\Delta\theta_o - K_{25}\Delta P_n \end{cases} \quad (7)$$

Для проведення імітаційного моделювання, користуючись цією системою рівнянь, складаємо структурну схему об'єкта управління (рис.2). Аналіз статичних і динамічних характеристик технологічного об'єкта управління виконується на основі отриманої математичної моделі.

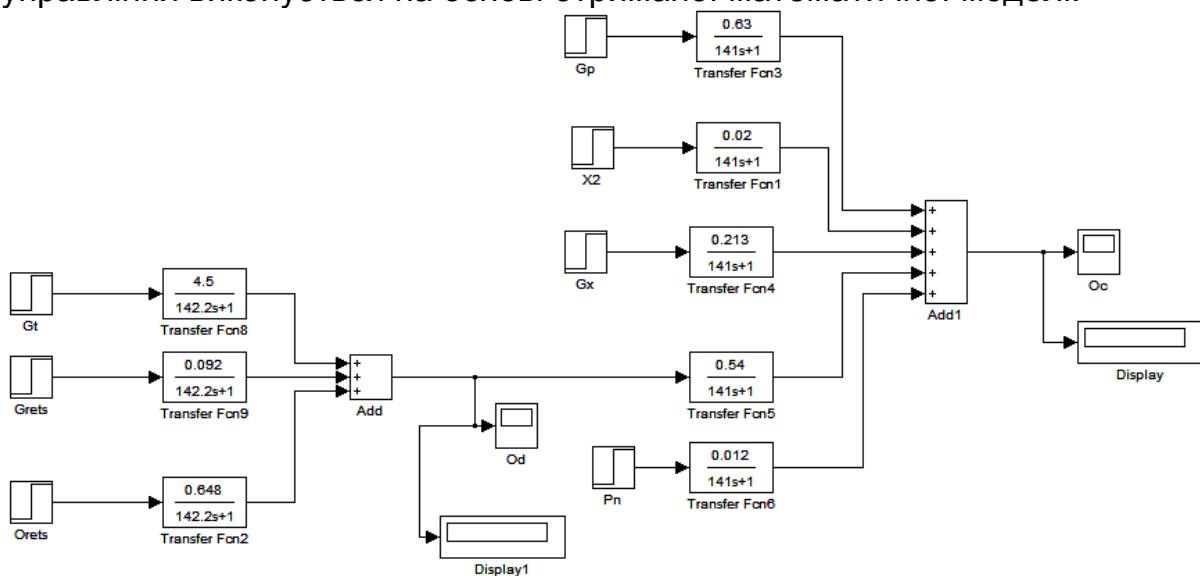


Рис.2. Структурна схема моделі температурних режимів роботи хлібопекарської печі

Будь-яка система автоматичного управління повинна передавати або перетворювати необхідним чином не один визначений сигнал, а сукупність таких сигналів, причому характер зміни кожного з них заздалегідь повністю визначити неможливо. Тому, за розробки інтелектуальної системи управління необхідно провести статистичний аналіз основних збурень та координат стану об'єкта, щоб віднести їх до конкретного класу випадкових процесів.

Експериментальні дані для температурного режиму роботи хлібопекарської печі за усталеної нормальної її роботи отримані на ТзОВ "Нові перспективи". Для визначення статичних характеристик можна обмежитися єдиним дослідом, що проведений протягом досить великого інтервалу часу, тобто обмежитися обробкою однієї реалізації замість множини дослідів [7]. Складання записів в таблицю експериментальних даних проводилося з дискретністю $\Delta t = 0,5T_{вчк}$, де $T_{вчк}$ – найбільший період високочастотних коливань(що в нашому випадку приблизно рівний 5 хв.), протягом трьох днів.

Для того, щоб перевірити, наскільки точно побудована модель роботи імітує або передбачає дані спостережень, необхідно порівняти їх за однакових дій. Для основних змінних хлібопекарської печі визначалися статистичні характеристики, такі як:

- математичне сподівання:

$$m_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt; \quad (8)$$

- Дисперсія:

$$D_x = M[(x(t) - m_x)^2] = \frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - m_x)^2 dt. \quad (9)$$

Оцінка адекватності отриманої динамічної математичної моделі (10) об'єкта проводилась таким чином: визначалися статистичні характеристики об'єкта за експериментальними даними, потім вхідні дії з відповідними характеристиками m_x, D_x подавались на математичну модель і вимірювались відгуки на ці дії (вихідні сигнали). Далі порівнювались вихідні сигнали об'єкта і математичної моделі за однакових вхідних дій. Вхідні і вихідні сигнали та вибрана математична модель використовувались для оцінки значень параметрів відповідно до ухваленого критерію якості.

Критерій якості ідентифікації характеризує ступінь адекватності моделі об'єкта в рамках узгоджених припущень і обмежень. Використано середньоквадратичний критерій, відповідно до якого знайдено середнє значення квадрату різниці вихідних сигналів моделі і об'єкта за одних і тих же вхідних дій:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x^{ob} - x^{mod})^2}, \quad (10)$$

де N – об'єм вибірки.

Оскільки всі статистичні параметри, окрім температури середовища в камері випікання та температури димових газів на виході з топки, є управляючими чи збурювальними діями, то для цих параметрів не розраховується значення середньоквадратичного критерію. Результати статистичної обробки експериментальних даних основних технологічних змінних роботи хлібопекарської печі наведені в таблиці.

Результати статистичної обробки експериментальних даних основних технологічних змінних роботи хлібопекарської печі

Статистичні параметри розподілу	Одиниця виміру	X_{max} , °C, кг/с	X_{min} , °C, кг/с	m_x , °C, кг/с	D_x , °C ² , (кг/с) ²	max δ , °C
Температура середовища в камері випікання, θ_c	°C	259,1	197,3	231,63	12,31	0,33
Температура димових газів на виході з топки, θ_d	°C	387,7	295,3	351,44	16,55	0,61

Отже, всі змінні підсистеми хлібопекарської печі є випадковими величинами та існують ситуації, коли в них з'являється детермінована складова.

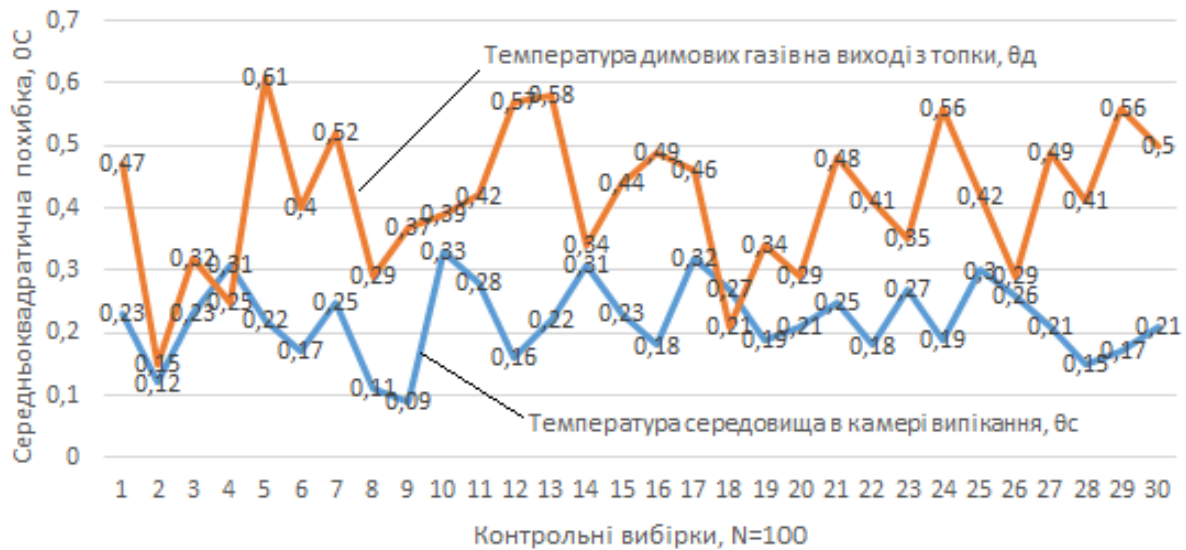


Рис. 3. Оцінка критерію якості ідентифікації математичної моделі по деяким контрольним вибіркам, N= 100

За результатами розрахунків, середньоквадратична похибка моделювання δ (різниця температур на виході об'єкта та моделі) не перевищує 1°C . Отже, розроблена математична модель є цілком адекватною обраному об'єкту.

Висновки

На основі теплових балансів роботи топки та камери випікання виведено математичну модель хлібопекарської печі за температурою. Проведено статистичну обробку експериментальних даних основних технологічних змінних роботи хлібопекарської печі та доведено, що розроблена математична модель є цілком адекватною обраному об'єкту

Список літератури

1. Момотюк В. В. Енергоаудит комбінату – основа розробки енергозберігаючих технологій і створення інтелектуальної системи управління електротехнологічним комплексом / В. В. Момотюк, В. В. Козирський // Науковий вісник НУБіП України. – 2016. – Вип. 242. – С. 124 – 131.
2. Дробот В. І. Технологія хлібопекарського виробництва / В. І. Дробот. – К.: Логос, 2002. – 365 с.
3. Злобин Л. А. Оптимизация технологических процессов хлебопекарного производства/ Л. А.Злобин. – М.: Агропромиздат, 1987. – 200 с.
4. Благовещенская М. М. Информационные технологии систем управления технологическими процессами/ М. М. Благовещенская, Л. А. Злобин. - М.: Высшая школа, 2005.–768с.
5. Карпов В. И. Концепция развития АСУП и АСУ ТП на предприятиях отрасли хлебопродуктов/ В. И. Карпов, К. С. Мышенков, В. О. Новицкий и др.// Отчет по НИР: МТИПП. -М., 1990. - 406 с.

6. Романова О. С. Процессное управление предприятиями хлебопекарной промышленности/О. С. Романова.- М.:Хлебпродинформ, 2006.-256 с.

7. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау; пер. с англ. В. Д. Скаржинского; под ред. В.Г. Горского. – М.: Мир, 1973. – 957 с.

References

1. Momotiuk, V. V., Kozyrskiy, V. V. (2016). Enerhoaudyt kombinatu – osnova rozrobky enerhozberihaiuchykh tekhnolohii i stvorennia intelektualnoi systemy upravlinnia elektrotekhnolohichnym kompleksom [Energy plant - through the development of energy-saving technologies and the creation of intellectual system of electro-technological complex]. Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy, 242, 124 – 131.

2. Drobot, V.I. (2002). Tekhnolohiia khlibopekarskoho vyrobnytstva [Technology of bakery production]. Kiyiv: Lohos, 365.

3. Zlobin, L. A. (1987). Optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov khlebopekarnogo proizvodstva [Process optimization bakeries]. Moskow: Agropromizdat, 200.

4. Blagoveshchenskaya, M. M., Zlobin, L. A. (2005). Informatsionnyye tekhnologii sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami [Information Technology of Process Control Systems]. Moskow: Vysshaya shkola, 768.

5. Karpov. V. I., Myshenkov, K.S., Novitskiy, V.O. i dr (1990). Kontseptsiya razvitiya ASUP i ASU TP na predpriyatiyakh otrasli khleboproduktov [The concept of MES and automation systems at the enterprises of bakeries industry]. Otchet po NIR: MTIPP. Moskow, 406.

6. Romanova, O. S. (2006). Protsessnoye upravleniye predpriyatiyami khlebopekarnoy promyshlennosti [Process control enterprises of the baking industry]. Moskow: Khlebproinform, 256.

7. Khimmel'blau, D. (1973). Analiz protsessov statisticheskimi metodami: per. s angl. V.D. Skarzhinskogo; pod red. V.G. Gorskogo [Process analysis with statistical methods]. Moskow: Mir, 957.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ВЫПЕЧКИ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

**В. В. Козырский,
В. В. Момотюк**

Аннотация. Для возможности оценки эффективности процесса выпечки хлеба, исследования статических и динамических режимов и их влияния на показатели работы объекта выведена математическая модель хлебопекарной печи по температуре. Для анализа статических и динамических характеристик на базе полученной математической модели составлена структурная схема объекта управления. В рамках согласованных предположений и ограничений сформирован критерий качества идентификации и доказана адекватность выведенной математической модели объекта.

Ключевые слова: хлебопекарное производство, энергоэффективность, система управления, имитационное модели-

рование, критерий качества идентификации, среднеквадратичная погрешность моделирования

ANALYTICAL MODELING OF THE TEMPERATURE REGIME DURING BAKING OF BAKERY PRODUCTS

**V. Kozyrsky,
V.Momotyuk**

Annotation. *To be able to evaluate the effectiveness of the process of baking bread, the study of static and dynamic modes and their effect on facility performance indicators the mathematical model of the baking furnace temperature are derived. To analyze the static and dynamic characteristics obtained based on the mathematical model is made a block diagram of the control object. The identifying quality criteria are formed and proved adequate derived mathematical model of the object within the agreed assumptions and limitations.*

Key words: *bakery production, energy efficiency, control system, simulation, quality criteria of identification, the mean square error of the simulation*

УДК 631.24.243

ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ В РЕМОНТНИХ МАЙСТЕРНЯХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

**Г. Б. ІНОЗЕМЦЕВ, доктор технічних наук, професор
О. В. ОКУШКО, кандидат технічних наук, доцент
Національний університет біоресурсів і
природокористування України
e-mail: oaleks@ukr.net**

Анотація. *Розглянуто сучасні технології з відновлення і ремонту техніки та обладнання сільськогосподарського призначення в ремонтних майстернях*

Ключові слова: *електротехнології, ремонтна майстерня, техніка, обладнання, електростатичний метод, покриття, ультразвукова обробка*

В технологічних процесах сільськогосподарського виробництва застосовується достатньо велика кількість різноманітної техніки та електричного обладнання, ефективність і надійність роботи якої, в значній