***Відновлювані джерела енергії, генеруючі потужності, система управління, мережі низької напруги, PLC, розподілена генерація, система управління генерацією, широкосмуговий доступ, ККД.***

*A system for controlling the generation, depending on the power consumption and the possibility of using renewable energy sources are developed. As a physical medium for the transmission of broadband signals control the generation of such a system is planned to use a physical medium transmission.*

***Renewable energy generation capacity, control system, low voltage network, PLC, distributed generation, the generation of the control system, broadband access, efficiency.***

УДК 62-533.65

# ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРИ ЕЛЕКТРОПЕЧІ З РІЗНОМАНІТНИМИ АЛГОРИТМАМИ ФАЗЗІ-КЕРУВАННЯ

***П.Б. КЛЕНДІЙ, В.Ю. РАМШ, М.В. РУСИНЯК,***
***кандидати технічних наук***
***Г.Я. КЛЕНДІЙ, інженер***
***ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»***

*Проаналізовано можливість і доцільність побудови фаззі-регуляторів температури електропечей опору (ЕПО) та впливу на характеристики регулятора температури різноманітних алгоритмів нечіткого керування, що визначаються видом функцій належності і використовуються вхідними сигналами.*

***Система автоматичного регулювання, електропечі опору, фаззі-регулятор, нечітка логіка, функції належності, показники якості регулювання.***

Нині велика увага приділяється вивченню систем керування з використанням математичного апарату нечіткої логіки (фаззі-логіки). Такі системи почали застосовувати для керування різними об'єктами [4].

У роботі [1] були розглянуті основні принципи і правила побудови і функціонування фаззі-регуляторів температури стосовно управління ЕПО.

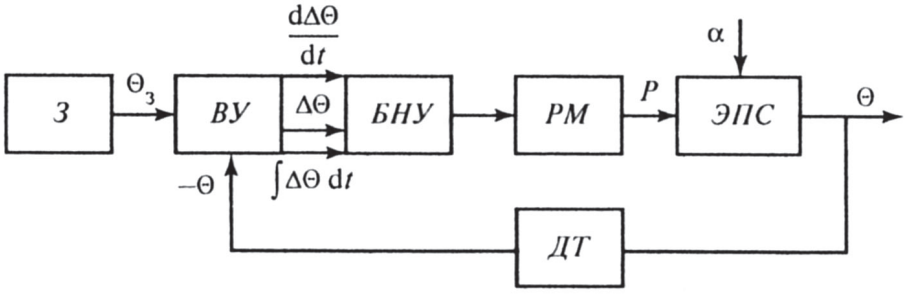
На рис. 1 наведена функціональна схема нечіткої системи автоматичного регулювання (САР) температури ЕПО, яка за структурою аналогічна традиційній схемі керування і відрізняється тільки алгоритмом функціонування регуляторів. Задане значення температури $\Theta_3$ формується блоком задання 3, на виході елемента порівняння виробляється сигнал розузгодження $\Delta\Theta$ – різниця сигналу задання $\Theta_3$ і сигналу $\Theta$, отриманого від датчика температури ДТ. Керуючим впливом є потужність $P$ на виході

*© П.Б. КЛЕНДІЙ, В.Ю. РАМШ, М.В. РУСИНЯК, Г.Я. КЛЕНДІЙ, 2015*

виконавчого пристрою – регулятора потужності $PM$. При моделюванні враховується збурення $\alpha$.

Обчислювальний пристрій $BУ$, в системі що розглядається, виконує функції попередньої обробки і розраховує необхідні значення вхідних сигналів фаззі-регулятора. Сигнали з виходу $BУ$ надходять на блок, який реалізує нечітке керування БНК.

Властивості і можливі варіанти побудови систем керування визначаються видами функцій належності і використовуваними вхідними сигналами фаззі-регулятора.




ЕП

**Рис. 1. Функціональна схема нечіткої системи автоматичного регулювання температури ЕПО**

У САР температури ЕПО можна використовувати такі вхідні сигнали фаззі-регулятора (табл. 1).

**Використовувані вхідні сигнали фаззі-регулятора**

| Відхилення температури | Відхилення температури і похідна відхилення температури | Відхилення температури та інтеграл від відхилення температури |
|---|---|---|
| $\Delta\Theta$ | $\Delta\Theta, \frac{d\Delta\Theta}{dt}$ | $\Delta\Theta, \int \Delta\Theta dt$ |

Далі порівняльні дослідження проводяться з наведеними видами сигналів.

Формальне визначення нечіткої множини не накладає ніяких обмежень на вибір конкретної функції належності, тобто такої функції $\mu_A(x)$ (рис. 2) нечіткої множини $A$, яка ставить у відповідність кожному із елементів $x$ дійсне число з інтервалу [0; 1] для його представлення. На практиці зручно використовувати ті з них, які можуть бути аналітично представлені простою математичною функцією. Це спрощує не тільки відповідні числові розрахунки, але й скорочує обчислювальні ресурси регуляторів, необхідні для зберігання окремих значень цих функцій належності. Відповідно, вибір виду функції належності в системі нечіткого керування є важливою задачею проектування фаззі-регулятора. Для систем керування технологічними об'єктами [3] найдоцільнішим вважається використання видів функцій, графічне представлення та аналітичний опис яких наведено в табл. 2.

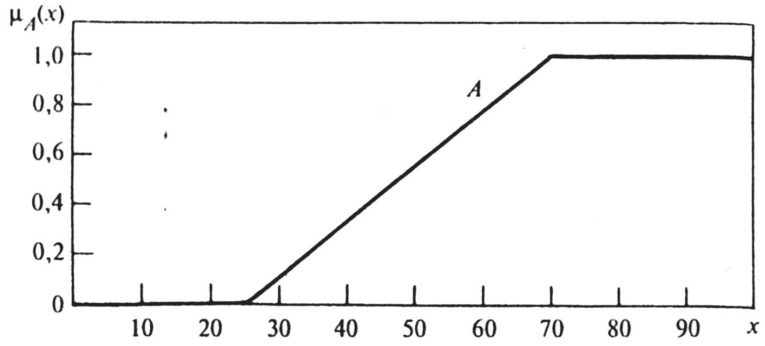
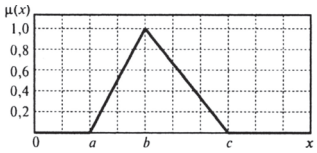
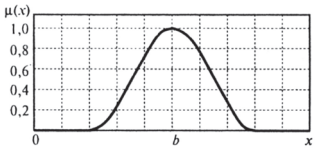
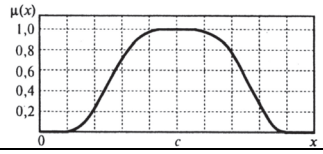



**Рис. 2. Функція належності нечіткої множини** $A$

**Види функцій належності, які використовуються в САР**

| Вид функції | Графічне представлення | Аналітична формула |
|---|---|---|
| Трикутна |  | $\mu(x)=\begin{cases}0, x\le a,\\ \dfrac{x-a}{b-a}, a\le x\le b,\\ \dfrac{c-x}{c-b}, b\le x\le c,\\ 0, c\le x\end{cases}$ |
| Симетрична гаусівська |  | $\mu(x)=e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}$ |
| Узагальнена дзвоноподібна |  | $\mu(x)=\dfrac{1}{1+\left\|\dfrac{x-c}{a}\right\|^{2b}}$ |

Основний вибір виду функцій належності і вхідних сигналів для конкретного регулятора температури доцільно провести на основі дослідження якості і точності регулювання.

**Мета досліджень –** побудова фаззі-регулятора температури електропечі опору (ЕПО) та визначення раціонального алгоритму нечіткого керування.

**Матеріали та методика досліджень.** Система з фаззі-логікою є суттєво нелінійною і не може бути досліджена аналітично, тому був використаний метод структурного моделювання в програмному пакеті MatLAb, додатках Simulink, Fuzzy Logic Toolbox, необхідних для аналізу і синтезу систем керування, заснованих на нечіткій логіці [2].

З метою узагальнення одержаних результатів моделювання було виконано у доволі відносних одиницях: температури $\Theta^*(t)$, потужності $P^*(t)$ і часу $\tau$.

Як базові величини були використані:

1) номінальна потужність, яка вводиться в піч, $P_б = P_{ном}$ ;

2) номінальна температура в печі $\Theta_б = \Theta_{ном}$;

3) постійний час печі $T_б = T_{ном}$.

Відносні величини визначалися за такими виразами:

- потужність, яка вводилася в піч, $P^* = P / P_б$;
- температура в печі $\Theta^* = \Theta / \Theta_б$;
- відносний час процесу $\tau = t / T_б$;
- збурення, яке вводиться в піч, $\alpha^* = P^*$.

Дослідження проводилися при типових діапазонах зміни параметрів і величин . Для забезпечення однакової швидкості процесів нагрівання і остигання печі потужність регулятора була прийнята з запасом: $\frac{P_{\max}}{P_{ном}} \geq 2,$ де $P_{\max}$, $P_{ном}$ – максимальна і номінальна потужність регулятора відповідно. В процесі дослідження максимальна потужність регулятора $P_{\max} = 2 = const$.

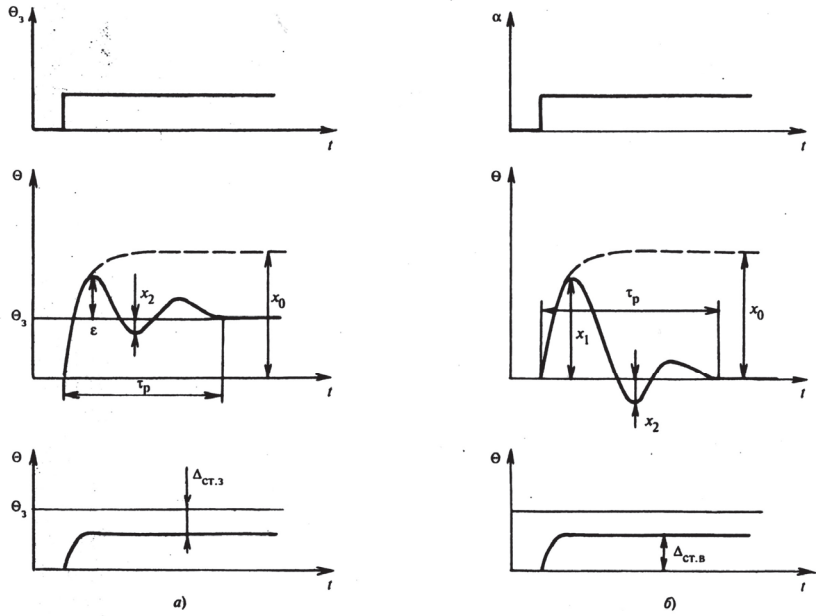



**Рис. 3. Показники якості регулювання температури при обробці задаючого (а) і збурюючого (б) впливів**

Діапазони зміни параметрів:

- потужність, яка вводиться в піч, $0 \leq P^* \leq 2$;
- задане значення температури $0 \leq \Theta_3^* \leq 1$;
- збурюючий вплив (із практики [5]) $0 \leq \alpha^* \leq 0{,}5$;

як типовий був прийнятий режим, для якого характерні такі параметри:

- максимальна потужність регулятора $P_{\max}^* = 2$;
- задане значення температури $\Theta_3^* = 1$;
- збурюючий вплив $\alpha^* = 0.5$.

У процесі дослідження на моделі розраховувались перехідні функції зміни температури $\Theta^*(t)$ і потужності $P^*(t)$, яка вводиться в піч при ступінчастій зміні температури задання $\Theta_3^*(t)$, і збурюючого впливу $\alpha^*(t)$.

За цими графіками (рис. 3) були визначені такі показники якості і точності регулювання:

– максимальне динамічне відхилення температури $x_1$ від заданого значення при однократному ступінчастому збуренні $\alpha$ і максимальне перерегулювання $\varepsilon$ при відробці ступінчастого задаючого впливу $\Theta_3$;

– динамічний коефіцієнт регулювання $R_\partial$, який характеризує степінь впливу регулятора, $R_\partial = x_1 / x_0$;

– коефіцієнт згасання $k_3$ – відношення другої (протилежно направленої) амплітуди коливань до першої максимальної амплітуди;

$k_3 = x_1 / x_2$,

– степінь, що характеризує коливання перехідного процесу;

– час регулювання $\tau_p$ – тривалість перехідного процесу від моменту подачі задаючого або збурюючого впливу до стабілізації температури на заданому значенні (з відомим ступенем точності);

– статична похибка за заданням $\Delta_{ст.з}$ і за збуренням $\Delta_{ст.в}$ – відхилення значення температури, яке встановилося від заданого значення при відпрацюванні відповідно задаючого і збурюючого впливу.

Показники якості залежать від динамічних властивостей об'єкта, задаючого і збурюючого впливу, закону регулювання, чутливості і налаштувань регулятора. Розглянуті показники якості перехідних процесів використовувалися у роботі для порівняльного аналізу традиційного пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора (ПІД-регулятора) температури і фаззі-регуляторів із різними вхідними сигналами і видами функцій належності.

Результати досліджень. Якість і точність регулювання температури ЕПО за допомогою фаззі-регулятора практично не залежать від виду функцій належності і вхідних сигналів (табл.3). Ця обставина дозволяє рекомендувати для практичної реалізації фаззі-регулятор з мінімальною складністю алгоритму керування, тобто регулятор, побудований за допомогою трикутних функцій належності і відхиленнями температури як і вхідного сигналу.

Очевидно, що остаточна думка про доцільність вибору того або іншого фаззі-регулятора температури можна зробити тільки після оцінки часової ємнісної складності (загальної пам'яті, необхідної для реалізації алгоритму) запропонованих алгоритмів керування, які визначались за методикою.

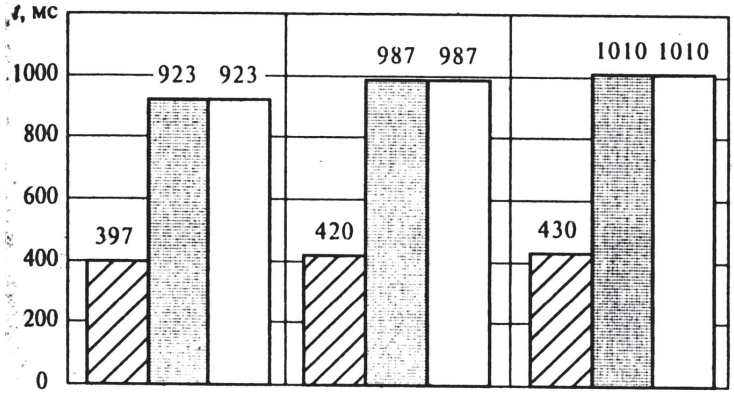
Часова складність нечітких алгоритмів оцінювалася за формулою:

$$\Theta FLC = \sum_{i=1}^{n_x} m_x \Theta MF_i + n_r[(G+1)a_I + Ga_I] + n_z(2Ga_D + Gb_D + c_D),$$

**Показники якості регулювання перехідних процесів в нечіткій і традиційній САР ЕПО**

| Показник якості регулювання | Фаззі-регулятор температури ЕПО | | | | | | | | | Підрегулятор температури ЕПО |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Види функцій належності | | | | | | | | | |
| | Трикутна | | | Гаусівська | | | Дзвоноподібна | | | |
| | Вхідні сигнали регулятора | | | | | | | | | |
| | $\Delta\Theta$ | $\Delta\Theta, \frac{d\Delta\Theta}{dt}$ | $\Delta\Theta$ | $\int \Delta\Theta dt$ | $\Delta\Theta$ | $\Delta\Theta, \frac{d\Delta\Theta}{dt}$ | $\Delta\Theta$ | $\Delta\Theta, \frac{d\Delta\Theta}{dt}$ | $\Delta\Theta, \int \Delta\Theta dt$ | $\Delta\Theta$ |
| Максимальне динамічне відхилення температури від заданого значення $x_1$, % | 0,014 | 0,043 | 0,043 | 0,012 | 0,046 | 0,044 | 0,011 | 0,050 | 0,045 | 2,850 |
| Перерегулювання $\varepsilon$, % | 0,057 | 0,171 | 0,171 | 0,048 | 0,185 | 0,177 | 0,045 | 0,200 | 0,180 | 5,000 |
| Динамічний коефіцієнт регулювання $R_Д$ | 0,999 | 0,998 | 0,998 | 0,999 | 0,998 | 0,998 | 0,999 | 0,998 | 0,998 | 0,952 |
| Коефіцієнт згасання $k_3$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,05 |
| Час регулювання $\tau_p$ | 2,20 | 2,32 | 2,32 | 2,23 | 2,35 | 2,35 | 2,25 | 2,38 | 2,38 | 2,50 |

де $n_x$ – число вхідних змінних; $n_r$ – число правил; $n_z$ – число вихідних змінних; $G$ – число точок дискретизації вихідної функції належності; $m_x$ – число нечітких наборів вихідних змінних; $\Theta MF_i$ – середня часова трудоємність обчислення функції належності трикутної $\Theta_{MF} = 2a_F + b_F$; гаусівської $\Theta_{MF} = a_F + 3b_F + c_F + e_F$; дзвоноподібної $\Theta_{MF} = 2a_F + 2b_F + 2c_F + d_F$; $a, b, c, d, e$ – параметри (з відповідними індексами), які визначають часову складність виконання елементарних операцій при визначенні часової складності обчислень, тут $\alpha$ – додавання/віднімання/порівняння; $b$ – множення; $c$ – ділення; $d$ – степенева функція; $a_F, a_I, a_D$ – часова складність елементарної операції на етапі фазіфікації, логічного виходу і дефазіфікації відповідно.




– відхилення температури;

– відхилення і похідна відхилення температури

– відхилення та інтеграл відхилення температури.

**Рис. 4. Діаграми часової складності реалізації алгоритмів нечіткої САР**

Як випливає із наведених на рис.4 діаграм, з ускладненням виду функції належності збільшується час реалізації алгоритму керування для всіх сигналів, які подаються на вхід фаззі-регулятора. Найменше часу для реалізації алгоритму потрібно для фаззі-регулятора, де як вхідна величина застосовується відхилення температури при трикутній формі функції належності. Характерно, що при використанні як вхідних сигналів, відхилення та інтегралу відхилення температури, час реалізації алгоритму виявляється інваріантним відносно виду вхідних сигналів фаззі-регулятора.

При оцінці ємнісної складності обчислення нечітких алгоритмів визначалися такі складові загального об'єму пам'яті:

оперативна пам'ять

$$n_x l_A + \sum_{i=1}^{n_x} m_x l_B + n_r l_D + n_r G l_E + G l_H + 2 l_M + n_z l_N ;$$

пам'ять констант

$$4 \sum_{i=1}^{n_x} m_x l_C + m_z G l_F + G l_k ,$$

де $l_{A,\ldots,K}$ – об'єм використовуваної пам'яті для представлення змінної типу $A,\ldots,K$ .

На рис. 5 наведено діаграми, які ілюструють ємнісну складність обчислень нечітких алгоритмів. Оскільки складові загального об'єму пам'яті не залежать від типу функції належності, діаграми побудовані тільки для алгоритмів на основі трикутних функцій. Ємнісна складність алгоритму з відхиленням і диференціалом відхилення та відхиленням і інтегралом відхилення температури як вхідних сигналів аналогічні. Мінімальний об'єм загальної пам'яті має регулятор температури, де як вхідний сигнал використовується відхилення температури, а функція належності має найпростішу трикутну форму.

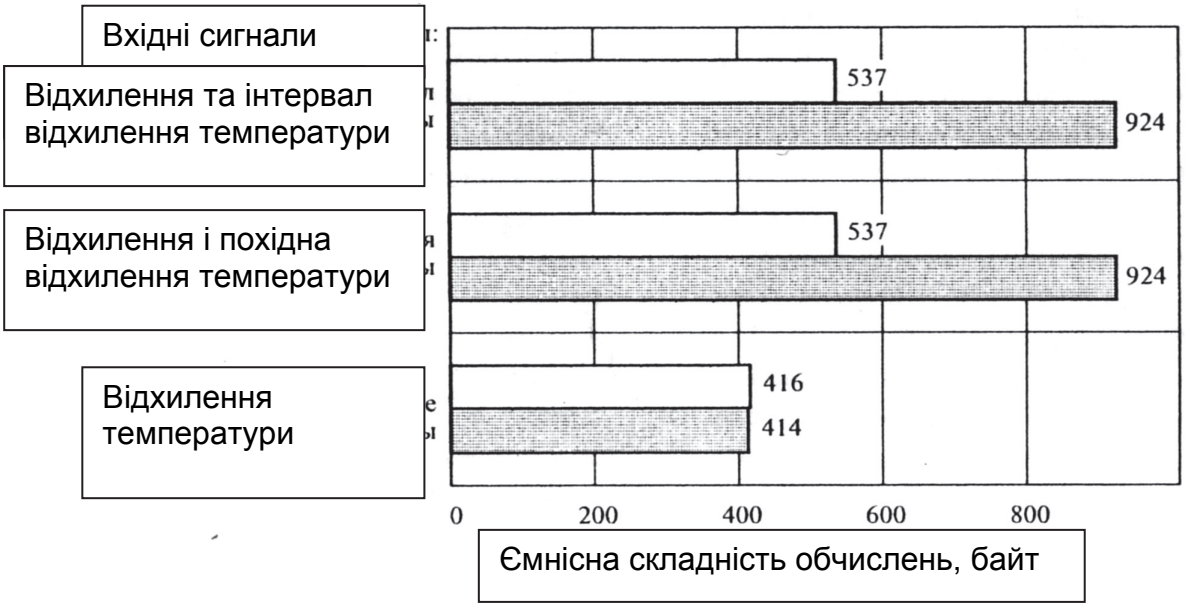



**Рис. 5. Діаграми ємнісної складності обчислення алгоритмів нечіткої САР ЕПО**

## Висновки

1. Встановлена можливість і доцільність побудови фаззі-регулятора температури ЕПО, який покращує показники якості і точності регулювання в порівнянні з традиційним ПІД-регулятором температури.

2. Доведена інваріантність показників якості регулювання фаззі-регулятора температури ЕПО від виду функцій належності і використовуваних вхідних сигналів, що дозволяє рекомендувати до застосування найпростіші функції належності, наприклад трикутні, для яких обчислювальна потужність алгоритму керування мінімальна.

3. Аналіз обчислювальної потужності показав, що використання більш складних (ніж трикутна) функцій належності призводить до збільшення часової та ємнісної складності реалізації нечітких алгоритмів, що нівелює їх позитивний вплив на якість регулювання в САР ЕПО.

**Список літератури**

1.Кирик В.В. Регулювання змінної напруги на нагрівальних елементах електропечі опору з використанням нечіткого логічного контролера / В.В. Кирик // Наук. пр. ІЕД НАН України. – К, 2004. – №1(7). – С.95–98.

2.Леоненков А.А. Нечеткое моделирование в среде Matlab и Fuzzy Tech / А.А. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 725 с.

3.Семенцов Г.Н. Аналіз і вибір форми функцій належності для фазифікації вхідних сигналів систем контролю і управління / Г.Н. Семенцов, О.В. Фадєєва // Вісник Хмельницького нац. ун-ту. Технічні науки. – 2006. – №1. – С.219–225.

4.FUZZY- системи – новий технологічний інструмент управління / Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, К.О. Липківський, В.В. Кирик // Технічна електродинаміка. – 2001. – №3. – С. 17–20.

*Проанализирована возможность и целесообразность построения фаззи - регуляторов температуры электропечей сопротивления ( ЭПО ) и влияния на характеристики регулятора температуры различных алгоритмов нечеткого управления, определяемых видом функций принадлежности и используемых входными сигналами.*

***Система автоматического регулирования, электропечи сопротивления, фаззи-регулятор, нечеткая логика, функции принадлежности, показатели качества регулирования.***

*The possibility and feasibility of constructing phase -controller electric resistance (EPO) and the impact on the Temperature characteristics of various fuzzy control algorithms that define the type of membership functions and input signals used.*

***Automatic adjustment, electric resistance, fuzzy controller, fuzzy logic, membership function, quality regulation.***

УДК519.23

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗЕРНОВОГО СЛОЯ ПРИ СВЧ-КОНВЕКТИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

***Д.А. БУДНИКОВ, кандидат технических наук***
***ФГБНУ «Всероссийский институт электрификации сельского хозяйства», г. Москва***

*Приведены результаты исследований динамических свойств зерновой массы при СВЧ-конвективной сушке. Установлено, что для качественного описания поведения зернового слоя при нахождении переходной функции требуется уравнение третьей степени.*

***СВЧ-конвективная сушка, послеуборочная обработка, динамические свойства, идентификация.***

*© Д.А. БУДНИКОВ, 2015*