

Побудована фізична модель включає такі основні складові:

1. Електричні мотори для управління рухом машинки (4 мотори: кожен відповідає за напрямок руху).
2. Портативне живлення для Raspberry Pi. На рис. 5 її розміщено під самим Raspberry Pi.
3. Сам мікрокомп'ютер із всіма необхідними елементами.
4. Живлення для моторів – акумуляторна батарея, яка розміщується на дні машинки.

Фізична модель відрізняється від попередніх тим, що база робототехнічної системи містить власне живлення для моторів, до бази приєднується невеликими провідниками мікрокомп'ютер Raspberry Pi, який має власне живлення, що дає змогу системі працювати довший проміжок часу без дозарядки. Розроблений макет робототехнічної системи дає змогу перевірити правильність та коректність розроблених моделей.

**Висновки.** Розроблена структура підсистеми й алгоритм роботи дають змогу правильно й ефективно створювати програмне забезпечення для підсистеми віддаленого управління.

Розроблена модель на основі мереж Петрі дає змогу дослідити динаміку роботи підсистеми, а фізичну модель підсистеми віддаленого управління використано в складі макету РТС, що підтверджує правильність проектних рішень.

### Література

1. Brooks R. A robust system layered control system for a mobile robot / R. Brooks // IEEE Trans. on robotics and automation. 1986. RA-2. – Рр. 14-23.
2. Баранов Д.Н. Интеллектуальное управление робототехническими системами на основе следящей системы технического зрения и нечёткой логики / Д.Н. Баранов, Ю.В. Подураев // Экстремальная робототехника : труды 19-ой Всеросс. науч.-техн. конф. – СПб., 2008.
3. Брускин Д.Э. Электрические машины и микромашины : учебник [для электротехн. спец. ВУЗов] / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – Изд. 3-е, [перераб. и доп.]. – М. : Изд-во "Высш. шк.", 1990. – 528 с.
4. Хахаев И.А. Практикум по алгоритмизации и программированию на Python / И.А. Хахаев. – М. : Изд-во "Наука", 2011. – 364 с.
5. Simon Monk. Adafruit's Raspberry Pi Lesson 4. GPIO Setup, 2014.
6. Arduino Mega. [Electronic resource]. – Mode of access <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>
7. Грицик В.В. Методологія системного проектування нейрокомп'ютерних засобів мобільних робототехнічних систем / В.В. Грицик, І.Г. Цмоць, В.М. Теслюк // Доповіді НАН України : зб. наук. праць. – 2013. – № 1. – С. 30-36.
8. Березький О.М. Прогнозування руху мобільної робототехнічної системи / О.М. Березький, І.Г. Цмоць, В.М. Теслюк, І.С. Ваврук // Моделювання та інформаційні технології : зб. наук. праць; відп. ред. В.Ф. Свєдкімов. – Львів : Вид-во ІПП "Сист. технол. інформ. послуги". – 2012. – Вип. 65. – С. 174-178.
9. Теслюк В.М. Структура та реалізація колісною робототехнічною системою / В.М. Теслюк, І.С. Ваврук, І.Г. Цмоць, Р.О. Ткаченко // Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту ISDMCI'2013 : матер. Міжнар. наук. конф. – Херсон : Вид-во ХНТУ, 2013. – С. 302-303.
10. Tsmots Ivan. Hardware and Software tools for motion control of mobile robotic system / Ivan Tsmots, Vasyly Teslyuk, Iryna Vavruk // Досвід розробки і застосування САПР в мікроелектроніці : матер. 30-ої Міжнар. конф. CADSM 2013, 19-23 лютого 2013, Поляна, Україна / НУ "Львів. політехніка". – Львів : Вид-во "Вежа і Ко", 2013. – С. 368-372.
11. Pavlo Denysyuk, Kateryna Matviichuk, Marta Duda, Taras Teslyuk, Yaroslav Kobyliuk. Technical Support For Mobile Robot System RoboCAD // Досвід розробки і застосування САПР в

мікроелектроніці : матер. 13-ої Міжнар. конф. CADSM 2013, 19-23 лютого 2013, Поляна, Україна / НУ "Львів. політехніка". – Львів : Вид-во "Вежа і Ко", 2013. – С. 431-432.

### **Комарницький М.В., Матвійчук Э.В., Теслюк В.Н. Структурная и физическая модели для автоматизированного проектирования подсистемы удаленного управления мобильной робототехнической системой**

Для проектирования подсистемы удаленного управления рассмотрены основные характеристики и области применения микрокомпьютеров, выбрана база для проектирования подсистемы. Разработана структурная схема и алгоритм работы подсистемы удаленного управления робототехнической системой. Построена модель на основе сетей Петри, которая позволяет исследовать динамику работы робототехнической системы. Проведен анализ данной сети с помощью построения графа достижимости. Представлена физическая модель реализации данной системы на базе микрокомпьютера Raspberry Pi, что позволило проверить корректность работы системы.

**Ключевые слова:** робототехническая система, удаленное управление, Raspberry Pi, сети Петри, физическая модель, структурная модель.

### **Komarnytskiy M.V., Matviichuk K.V., Teslyuk V.M. Structural and Physical Models for Automated Design Subsystem Remote Control of Mobile Robots Technical System**

For remote control subsystem design the basic characteristics and purpose microcomputers are studied, the basis for designing subsystem is selected. A structural diagram and the algorithm of the subsystem remote control robotic system are designed. A model based on Petri nets, which allows exploring the dynamics of the robotic system, is constructed. The network is analysed by constructing the reachability graph. Physical realization of this model system based on Raspberry Pi microcomputer, allowing to check the correctness of the system, is presented.

**Key words:** robotic systems, remote controls, Raspberry Pi, Petri nets, physical model, structural model.

УДК 674.047

Аспір. А.М. Комбаров<sup>1</sup> – НЛТУ України, м. Львів

### **МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ДЕРЕВИНИ ПІД ЧАС НАГРІВАННЯ**

Подано характеристику різним способам нагрівання деревини (конвективного, кондуктивного, радіаційного та електричного) з огляду енерговитрат. Наведено обґрунтування вибору породи деревини для експериментальних досліджень процесу нагрівання. Конвективне нагрівання характеризується змінним температурним полем у деревині і описується диференціальними рівняннями теплопровідності Фур'є. Для складання методики дослідження процесу нагрівання потрібно експериментальним або розрахунковим шляхом визначити всі величини, що є в розв'язку (у критеріальній формі) рівняння Фур'є. Для опису динаміки зміни температури деревини в процесі нагрівання виведено математичну модель, що достатньо точно апроксимує результати експериментальних досліджень.

**Ключові слова:** деревина, нагрівання, теплопровідність, температуропровідність, вологість, густина, питома теплоємність, математична модель, динаміка зміни температури.

Найбільш поширеним, хоча і не найінтенсивнішим способом нагрівання деревини є конвективний. Радіаційний спосіб можна використати для тонких

<sup>1</sup> Наук. керівник: проф. П.В. Білей, д-р техн. наук

матеріалів (наприклад шпон, картон) через те, що теплові промені проникають тільки на незначну глибину (до 7 мм) у деревину. Кондуктивний (контактний) спосіб нагрівання також можна рекомендувати тільки для тонких матеріалів, тому що тривалий контакт нагрівальної поверхні з матеріалом негативно впливає на його якісні показники. Діелектричний спосіб нагрівання є інтенсивним, при цьому нагрівання відбувається по всьому об'єму деревини (за умови однакової вологості). Однак, під час діелектричного нагрівання може відбутися неконтрольований процес сушіння. Таке нагрівання є дуже енерговитратним (у 2-3 рази дорожчим за конвективне) і потребує використання складного і дорогого обладнання [1-4].

Конвективне нагрівання деревини характеризується нестационарним теплообміном всередині матеріалу, і описується диференціальним рівнянням Фур'є, яке для пиломатеріалів можна записати у спрощеному вигляді:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{C\rho} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (1)$$

де:  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м<sup>2</sup>°C);  $C$  – питома теплоємність деревини, Дж/(кг°С);  $\rho$  – густина (об'ємна маса) деревини, кг/м<sup>3</sup>;  $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$  – напрямок потоку тепла відносно волокон (по товщині матеріалу).

Зовнішній теплообмін описується рівнянням Ньютона:

$$Q = \alpha(t_c - t_{nos})F \cdot \tau_n, \quad (2)$$

де:  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну між середовищем та поверхнею матеріалу, Вт/м<sup>2</sup>°C;  $t_c, t_{nos}$  – відповідно, температура середовища і поверхні матеріалу, °C;  $F$  – поверхня теплообміну, м<sup>2</sup>.

Сушильна камера, в якій проводиться нагрівання деревини (пиломатеріалів і заготовок), є складною термодинамічною системою – середовищем, яке здійснює свій вплив на фізичні властивості деревини. Термодинамічна система повинна забезпечити проведення тепловологооброблення і сушіння за заданими режимними параметрами.

На термодинамічну систему (середовище) впливають інші складові, а саме: тепла система, яка створює режимні параметри процесу нагрівання: конструкція сушильної камери, яка забезпечує ефективне використання теплової енергії і об'єкт дії середовища – матеріал з метою теплового оброблення або сушіння. Основним елементом теплової системи є теплообмінник (калорифер), який повинен забезпечити не тільки теплом для нагрівання матеріалу ( $Q_M$ ), але і компенсувати втрати теплової енергії через огороження, втрати теплової енергії з відпрацьованим агентом оброблення, витрати теплової енергії на початкове нагрівання сушильної камери та обладнання, що є в ній. Якщо позначити всю кількість теплової енергії, яка передається у середовище через ( $Q_K$ ), то тепловий коефіцієнт корисної дії обладнання визначають за формулою

$$\eta_T = \frac{Q_M}{Q_K} \cdot 100\% \quad (3)$$

Таким чином, температурний коефіцієнт корисної дії визначає працездатність підведеної теплоти, яку ще називають енергією теплоти –  $\varepsilon_Q$

$$\varepsilon_Q = \int \left( 1 - \frac{T_M}{T_C} \right) dQ, \quad (4)$$

де:  $T_M, T_C$  – відповідно температура поверхні матеріалу та середовища, К.

Для експериментальних досліджень обрано дві породи – дуб і сосна. Вибір експериментального матеріалу обґрунтовується тим, що серед найбільш поширених в Україні хвойних порід сосна займає перше місце, а серед твердих листяних порід – дуб. Серед різних видів дуба найбільше поширений дуб черешчатий, звичайний (*Quercus robur* L.), який займає 95 % площі дубових лісів. Дуб віднесено до кільцевосудинних ядрових порід деревини, має велику міцність, стійкість до гниття, добре гнеться та має гарну структуру. Через ці якості деревина дуба широко використовують для виготовлення паркету, шпону, меблів, у пасажирському вагоно- і суднобудуванні та бондарному виробництві. Деревина дуба має середню густину [5].

Деревина сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) належить до ядрових середньоважких хвойних порід, яка найпоширеніша на території України. Її використовують у будівництві як конструктивний матеріал, для столярних і меблевих виробів, а саме: пиловних, вироби з клеєної масивної деревини, плити, балки, вікна, двері, сходи, покриття стін, пакувальний матеріал, палети та паливні брикети. Для такого широкого використання деревини дуба і сосни необхідно досліджувати їх фізичні властивості та їх вплив на процеси теплового оброблення [5].

Витрати на нагрівання матеріалу у формулі (3) визначають за формулою

$$Q_M = m\bar{C}\Delta t = \rho_w V \bar{C} \Delta t, \quad \text{кДж} \quad (5)$$

де:  $m$  – маса матеріалу, кг;  $\bar{C}$  – питома теплоємність деревини, для середнього значення вологості деревини ( $\bar{W}$ , %) та середнього значення температури ( $\bar{t}$ , °C) у заданому діапазоні –  $\Delta t$ , кДж/(кг °C);  $V$  – об'єм зразка деревини або всього матеріалу, що є в штабелі, м<sup>3</sup>;  $\Delta t$  – зміна температури деревини під час нагрівання, °C;  $\rho_w$  – густина (об'ємна маса) деревини для даної вологості кг/м<sup>3</sup>.

За виразом ( $\rho_w V \bar{C} \Delta t$ ) можна знаходити кількість теплоти потрібну для нагрівання поверхневих або центральних шарів матеріалу, коли відома поверхня нагрівання ( $F$ , м<sup>2</sup>) глибина нагрівання ( $X$ , м) та питома теплоємність шару деревини (кДж/кг°C).

Під час дослідження процесів нагрівання деревини необхідно враховувати не тільки складність будови деревини, але і широкий діапазон зміни її фізичних властивостей, як природних, так і набутих у процесі нагрівання. Під час складання методики дослідження теплового оброблення необхідно визначити густину деревини (у вологому і абсолютно сухому стані та умовно базисну), розподіл вологості деревини по товщині матеріалу, зміну розподілу температур по товщині матеріалу, початкове та змінне значення температури середовища та матеріалу. На базі цих експериментальних даних можна визначити коефіцієнти теплопровідності ( $\lambda$ ) і температуропровідності ( $a$ ) деревини, питому теплоємність деревини ( $C$ ), які входять в теплообмінний критерій Фур'є ( $Fo$ ). Для визначення величини теплообмінного критерію Біо ( $Bi$ ) або Нуссельма ( $Nu$ ) потрібно ще визначити коефіцієнт теплообміну за формулою

$$\alpha = \frac{Q_M}{F(t_c - t_{нов})\tau}, \text{ кВт/м}^2\text{град}, \quad (6)$$

де:  $F$  – площа теплообміну, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – тривалість нагрівання, °С;  $t_c - t_{нов}$  – різниця температур між середовищем і поверхнею матеріалу, °С.

Безрозмірна температура ( $\theta$ ) – це є безрозмірний комплекс величин

$$\theta = \frac{t_c - t_x}{t_c - t_0} \quad (7)$$

де  $t_c$  – температура середовища, °С;  $t_0$  – початкова температура деревини °С;  $t_x$  – температура деревини на відстані ( $x$ ) від поверхні матеріалу, °С.

Таким чином, будуть знайдені всі величини, що входять в критеріальний розв'язок диференційного рівняння Фур'є (1), тобто функцію

$$\frac{t_c - t_x}{t_c - t_0} = f\left(\frac{X}{R}, Bi, Fo\right), \quad (8)$$

де  $X/R$  – координата точки виміру температури ( $t_x$ ).

Динаміку зміни температури середовища в сушарці можна визначити шляхом розв'язку такого диференційного рівняння:

$$T \frac{d\theta(\tau)}{d\tau} + \theta(\tau) = K_{II}\theta_p(\tau - \tau_0), \quad (9)$$

де:  $\frac{d\theta(\tau)}{d\tau}$  – зміна температури агента сушіння в камері за час ( $d\tau$ ), °С/хв;  $\tau_0$  – інерційність сушарки (транспортне запізнення), хв;  $\theta_p$  – величина зміни температури (збурення) в сушарці, °С;  $K_{II}$  – коефіцієнт передачі або реакція сушарки на відповідне збурення.

Якщо відомими є складові рівняння (9), які можна знайти тільки експериментальним шляхом, то розв'язок рівняння (9) можна представити в такому вигляді:

$$\theta(\tau) = K_{II}\theta_p(\tau - \tau_0) \left[ 1 - e^{-\frac{\tau - \tau_0}{T}} \right]. \quad (10)$$

Однак апроксимація експериментальних даних за залежністю не дає точного опису характеру динаміки нагрівання сушильної камери і матеріалу. Тому за результатами пошукових дослідів, доцільно запропонувати іншу математичну модель, що точніше характеризує температурний стан сушильної камери та матеріалу, що є в ній на даний момент часу –  $\tau$

$$\theta_\tau = t_0 + \frac{at^n}{e^{m\tau}}, \quad (11)$$

де:  $t_0$  – початкова температура (перед нагріванням) камери або матеріалу °С (коли  $t_0 > 0^\circ\text{C}$ );  $a, m$  – коефіцієнти рівняння;  $N$  – показники степеня.

**Висновок.** Таким чином, отриману математичну модель (11) можна використовувати як розрахункову для опису зміни температури, як сушильної камери, так і деревини під час її початкового нагрівання перед сушінням.

## Література

1. Білей П.В. Теоретичні основи теплової обробки і сушіння деревини : монографія / П.В. Білей. – Коломия : Вид-во "Вік", 2005. – 364 с.
2. Білей П.В. Сушіння та захист деревини : підручник / П.В. Білей, В.М. Павлюст. – Львів : Вид-во "Кольорове небо", 2008. – 342 с.
3. Білей П.В. Тепломасообмінні процеси деревообробки : підручник / П.В. Білей, І.В. Петришак, І.А. Соколовський, Л.Я. Сорока. – Львів : Вид-во ЗУКЦ, 2013. – 376 с.
4. Білей П.В. Теорія теплової обробки деревини / П.В. Білей, С.П. Кунинець, І.А. Соколовський, Л.Я. Сорока, В.Д. Синітович. – Львів : Вид-во ЗУКЦ, 2012. – 200 с.
5. Вінтонів І.С. Деревинознавство / І.С. Вінтонів, І.М. Сопушинський, А. Тайшінгер. – Львів : Вид-во "Апріорі", 2007. – 312 с.

### **Комбаров А.М. Методика исследования динамики изменения температуры древесины при нагреве**

Дана характеристика различным способам нагревания древесины (конвективного, кондуктивного, радиационного и электрического) с учетом энергозатрат. Приведено обоснование выбора породы древесины для экспериментальных исследований процесса нагрева. Конвективное нагревание характеризуется переменным температурным полем в древесине и описывается дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье. Для составления методики исследования процесса нагрева нужно экспериментальным или расчетным путем определить все величины, которые есть в решении (в критериальной форме) уравнения Фурье. Для описания динамики изменения температуры древесины в процессе нагревания выведена математическая модель, которая достаточно точно аппроксимирует результаты экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** древесина, нагревание, теплопроводность, температуропроводность, влажность, плотность, удельная теплоемкость, математическая модель, динамика изменения температуры.

### **Kombarov A.M. The Method of Studying the Dynamics of Temperature Change of Wood Heating**

Different ways of wood heating such as convection, conduction, radiation, and electrical concerning power inputs are characterised. The choice of the wood species for experimental studies of the heating process is substantiated. Convective heating is characterized by variable temperature field in wood and is described by the differential Fourier equation of thermal conductivity. To compile research methodology of heating process it is necessary to make experiment or calculation to determine all the quantities that there are in solution in the form of the Fourier equation criterion. To describe the dynamics of temperature change during the heating of wood a mathematical model that accurately approximates the results of experimental studies is derived.

**Key words:** wood, heat, thermal conductivity, heat capacity, moisture content, density, specific heat, mathematical model, temperature changes.

УДК 628.2 Доц. О.С. Мачуга, канд. фіз.-мат. наук – НЛТУ України, м. Львів

### **МЕТОДИКА ОЧИЩЕННЯ ВІДСТІЙНИКІВ КАНАЛІЗАЦІЙНИХ ОЧИСНИХ СПОРУД ВІД ЗАТВЕРДІЛОГО САПРОПЕЛЮ**

Сталий розвиток нерозривно пов'язаний з умінням ефективно очищати стічні води з відходів побуту та виробництва, а також утилізувати такі відходи. Економне відновлення експлуатованих каналізаційних очисних споруд потребує зокрема очищення та ремонту первинних відстійників, заповнених затверділим сапропелем. Для реалізації такого завдання проаналізовано низку підходів. Запропоновано та апробовано методику очищення відстійників за умови використання нескладного помпового обладнання вітчизняного виробництва, яка базується на розмиванні затверділих мас фекальними водами з верхньої частини відстійника та випуску такої суміші на мулові майданчики.