

А. І. Гапон, М. А. Денисенко, А. О. Зуєв, Н. О. Євсіна

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ СУШІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННОГО РЕГУЛЯТОРА

Анотація. Розглянуто процес сушіння деревини в якості основного капілярно-пористого матеріалу. **Метою** статті є розгляд метода оптимізації процесів сушіння капілярно-пористих матеріалів, у тому числі сушіння деревини та проведення моделювання температури у середині матеріалу за допомогою нейронного регулятора. Було визначено математичну модель об'єкта управління як камеру періодичної дії, яка є найбільш сприятлива для використання в лісозаготівельних підприємствах та як ту, що має гарні економічні показники. Проведено аналіз існуючих технічних рішень за даною тематикою. Показані налаштування та процедура ідентифікації нейронного регулятора що використовується в даній задачі. Розглянуто моделювання оптимальної температури від 0 до 100 градусів Цельсія. За **результатами** дослідження показано, що наведений метод застосовується до різних класів керованих процесів.

Ключові слова: сушильна камера, капілярно-пористі матеріали, нейронний регулятор, система управління, математична модель, об'єкт управління.

Вступ

Деревина є важливою та цінною виробничою сировиною. У багатьох галузях промисловості або будівництва широко використовується деревина у вигляді пиломатеріалів, фанери, деревних плит та інших. Проте деревина відрізняється серйозним недоліком - підвищеною вологістю. Процес сушіння – видалення рідини із матеріалів тепловими способами. Здійснюється шляхом випаровування рідини і відведення утворених пар при підведенні до матеріалу теплоти [1], що висушується, найчастіше за допомогою так званих сушильних агентів. При сушінні змінюється теплопровідність матеріалу, знижується його об'ємна вага та підвищується міцність [2]. Це може бути забезпечено при відповідному режимі процесу сушіння, який повинен проводитись за певної температури, тиску та відносної вологості сушильного агента. Режим сушіння залежить від властивостей матеріалу, що висушується [3].

Огляд існуючих методів сушіння та сушильних камер

З різноманітності можливих методів сушіння впливає безліч конструкцій сушарок для тих чи інших методів. За технологічними ознаками сушарки можна класифікувати так:

- по тиску (атмосферні та вакуумні);
- за періодичністю процесу (періодичної, напів-безперервної та безперервної дії);
- за способом підведення тепла (конвективні контактні, радіаційні та сушарки з нагріванням матеріалу струмами високої частоти);
- за родом сушильного агента (повітряні, газові сушарки та сушарки на перегрітій або насиченій парі);
- за напрямом руху матеріалу та теплоносія (прямоточні, протиточні та перехресного струму);
- за тепловою схемою (калориферні, з додатковим внутрішнім обігрівом, з рециркуляцією частини відпрацьованого повітря, зі східчастим підігрівом та комбіновані, наприклад, зі східчастим підігрівом та рециркуляцією).

В статті [4] показано процес моделювання

температури саме в калориферних камерах, але там не використовується сушіння деревини, яка має особливості.

Найбільш прийнятними установками для сушіння капілярно-пористих матеріалів є пароповітряні сушильні камери періодичної дії. Ці установки, що застосовуються на підприємствах із невеликими обсягами деревини. При сушінні матеріалів у таких камерах можна виділити три основні етапи: прогрів або пропарювання матеріалу; етап постійної швидкості сушіння; етап з падаючою швидкістю сушіння. В [5] розроблено алгоритм оптимального управління процесом нагріву, але недоліком даного методу є те, що він не відповідає вимогам швидкодії.

Метою статті є оптимізація та моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів у сушильних камерах періодичної дії із залученням нейронного регулятора.

Об'єкт управління – сушильна камера періодичної дії

На підставі експериментальних досліджень перехідних характеристик камери окремо для каналів регулювання по «сухому» і «мокрому» термометрам і фізичних залежностей між окремими величинами, що характеризують процеси в камері, в [6] була запропонована структурна схема, що складається з восьми ланок (рис. 1).

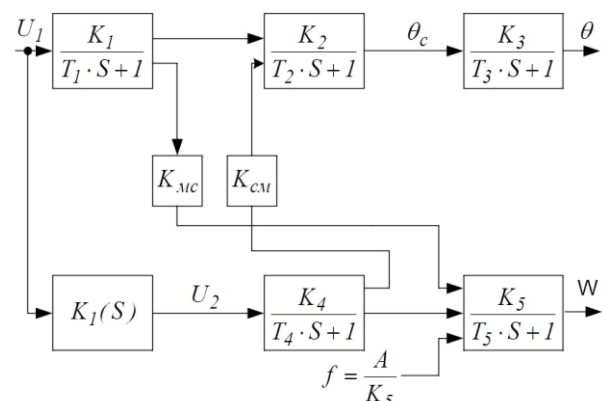


Рис. 1. Структурна схема об'єкта управління

При обмеженні положень засувок, величини U_1 та U_2 також обмежені. Ці обмеження є такими:

$$0 \leq U_1 \leq U_{1\text{макс}}, \quad 0 \leq U_2 \leq U_{2\text{макс}}. \quad (1)$$

Крім того, обмеження повинні бути накладені на швидкості зміни температури θ_c та вологості W матеріалу, оскільки надто високі градієнти цих параметрів можуть призвести до пошкодження матеріалу. Ці обмеження представлені у вигляді:

$$\left| \frac{d\theta}{dt} \right| \leq B_1, \quad \left| \frac{dW}{dt} \right| \leq B_2, \quad (2)$$

Тоді, передавальна функція може бути записана у такому вигляді:

$$K(s) = \frac{\theta(s)}{U_1(s)} = \frac{k_c(T_2s+1)(T_4s+1)}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)(T_4s+1)(T_{21}s+1)}, \quad (3)$$

Звідси видно, що об'єкт управління має дві пари однакових нулів і полюсів, що призводить до складності у реалізації управління, зважаючи на неповну керуваність об'єкту.

Моделювання з використанням прогнозуючих моделей

Для того щоби усунути недолік розглянутий вище, що притаманний реалізації управління розрахунковим методом, доцільно провести моделювання з використанням прогнозуючих моделей у системі MATLAB/Simulink за допомогою блоку NN Predictive Controller, що дозволяє реалізувати таке управління з передбаченням.

При управлінні з передбаченням, модель керованого процесу використовується для того, щоб передбачити його майбутню поведінку, а алгоритм оптимізації застосовується для розрахунку такого управління, яке мінімізує різницю між бажаними та дійсними змінами виходу моделі. При керуванні з урахуванням еталонної моделі, регулятор – це нейронна мережа, яка попередньо навчена керувати процесом, для того щоб він відстежував поведінку еталонного процесу [7]. При цьому модель керованого процесу активно використовується для налаштування параметрів самого регулятора.

Модель регулятора з передбаченням реалізується за допомогою Neural Network Toolbox згідно за схемою, наведеною на рис. 2. Схема включає модель керованого процесу у вигляді нейронної мережі, яка

має бути навчена так, щоб мінімізувати похибку e між реакціями процесу y_p та моделі y_m на вхідний сигнал (або послідовність сигналів) u .

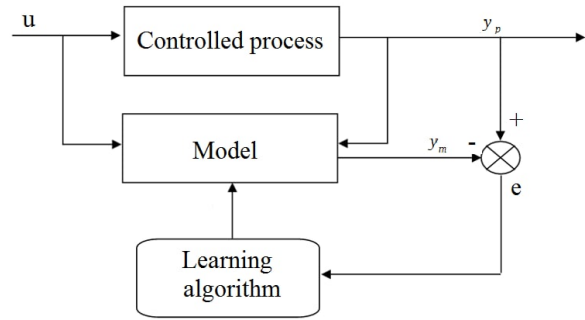


Рис. 2. Схема підсистеми ідентифікації керованого процесу

Об'єктом управління є сушильна камера, структурна схема якої після перетворень представлена на рис. 3.

Процес управління описується системою лінійних рівнянь п'ятого порядку, в кожне з яких входить лише одна фазова змінна, причому перші дві координати x_1 та x_2 змінюються згідно з [8], лише під впливом початкових умов.

Моделювання проводилось для процесу з наступними параметрами:

$$\begin{aligned} k_1 &= 130, & k_2 &= 0.61, & k_3 &= 1, & k_4 &= 40, \\ k_5 &= 2, & k_{mc} &= 0.8, & k_{cm} &= 0.75, \\ T_1 &= 1.12, & T_2 &= 1.17, & T_3 &= 2.33, & T_4 &= 0.33, \\ T_5 &= 0.83, & T_6 &= 1.84, & T_{21} &= 1.271. \end{aligned}$$

Після обчислення коефіцієнтів v_i за формулами:

$$\begin{aligned} v_1 &= v_2 = 0, \\ v_3 &= \frac{b_2}{(\lambda_3 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_5)}, & v_4 &= \frac{b_2}{(\lambda_4 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_5)}, \end{aligned} \quad (4)$$

складаємо систему диференціальних рівнянь та загальну схему об'єкта управління з використанням блоку NN Predictive Controller у Simulink, яка наведена на рис. 4.

Внутрішні дані блоку NN Predictive Controller (вікно Plant Identification) з параметрами об'єкту, для якого відбувається керування наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри симуляції для процедури ідентифікації

№	Назва параметру	Призначення	Величина
1	Size of Hidden Layer	розмір прихованого шару, визначається кількістю використовуваних нейронів	12 нейронів
2	Sampling Interval	такт дискретності в секундах, що визначає інтервал між двома послідовними моментами зйомки даних	0.001 с
3	No. Delayed Plant Inputs	кількість елементів запізнення на вході моделі	2
4	No. Delayed Plant Outputs	кількість елементів запізнення на виході моделі	5
6	Training Samples	довжина вибірки (кількість точок знімання інформації)	10000
7	Maximum Plan Input	максимальне значення вхідного сигналу	1
8	Minimum Plan Input	мінімальне значення вхідного сигналу	0
9	Maximum Interval Value	максимальний інтервал ідентифікації	0.1 с
10	Minimum Interval Value	мінімальний інтервал ідентифікації	0.01 с
11	Maximum Plan Output	максимальне значення вихідного сигналу	100
12	Minimum Plan Output	мінімальне значення вихідного сигналу	0

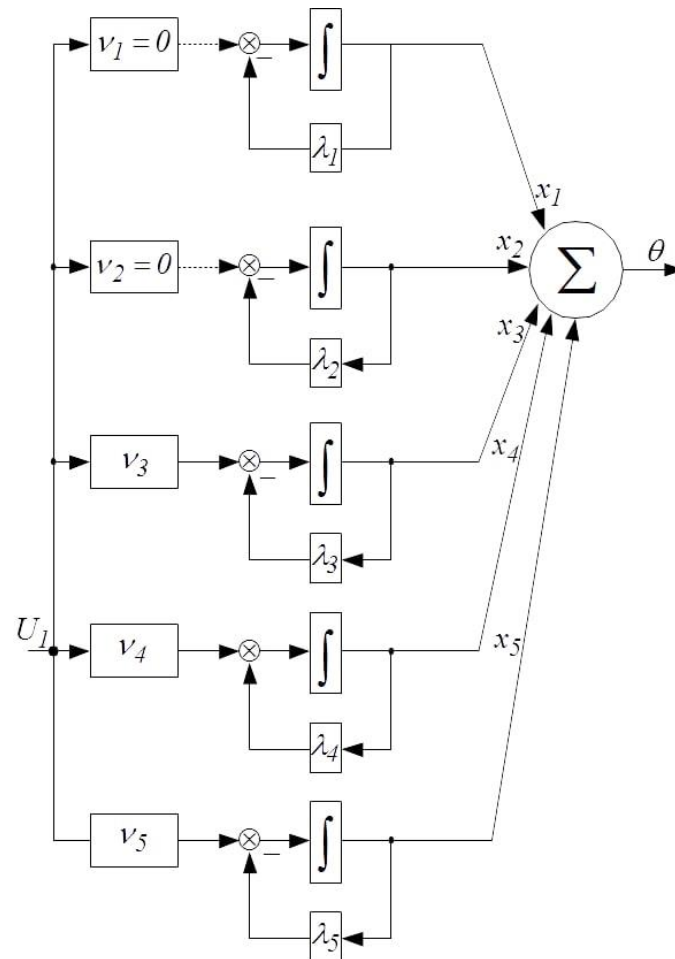


Рис. 3. Перетворена схема об'єкта управління

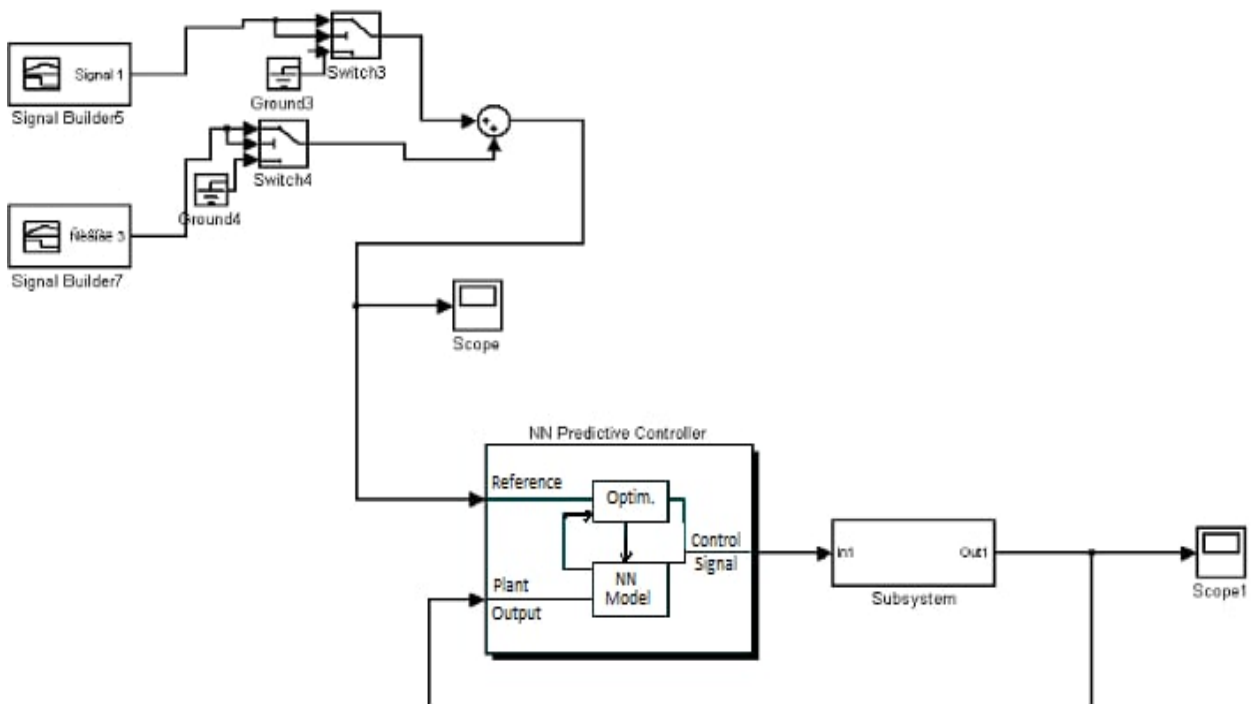


Рис. 4. Вигляд структурної схеми з прогнозуванням у Simulink

Параметри (табл. 2) є універсальним і можуть бути використані для побудови моделей будь-якого динамічного об'єкта, який описаний у Simulink.

Отримані результати моделювання температури від 0 °C до 100 °C усередині матеріалу наведені на рис. 5.

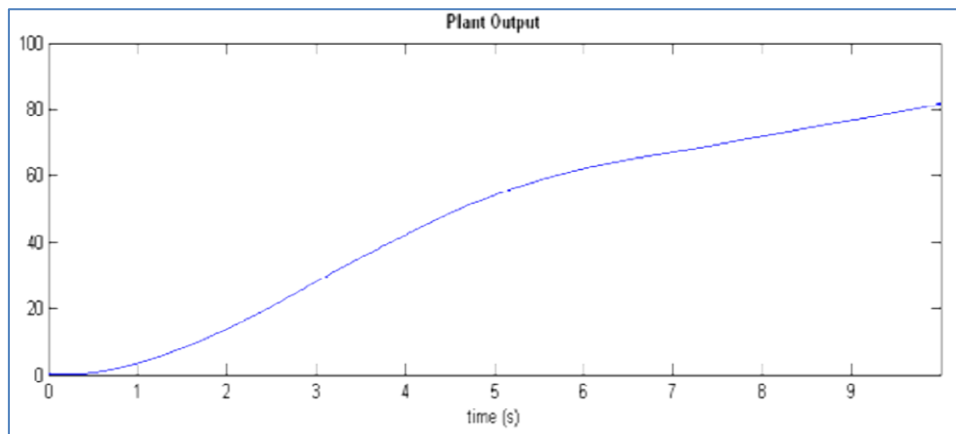


Рис. 5. Графік моделювання температури всередині матеріалу

Висновки

1. Визначення типу сушильної камери та обрання капілярно-пористого матеріалу є найбільш ефективним та практичним засобом, який реалізується на сьогоднішній день.

2. Проведений аналіз методів сушіння показав, що основною перевагою застосованого методу є те, що він застосовний до різних класів керованих процесів, а високі адаптивні властивості визначають його успішне використання у практиці побудови та експлуатації систем управління.

3. Проведено моделювання з застосуванням нейронного регулятора, яке довело плавне регулювання температури усередині матеріалу в заданому діапазоні. Відносним недоліком є те, що контролер, реалізує такий спосіб, вимагає значного обсягу обчислень, оскільки розрахунок оптимального закону управління оптимізація виконується кожному такті управління. Але слід сказати, що на практиці є контролери, які дозволяють вирішувати таке завдання.

Надалі передбачається застосування такого методу до моделювання більш складної системи управління.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ozarkiv, I. M., Kobrynovuch, M. S., Humeniuk, Z. H., & Petryshak, I. V. Контроль напружено-деформованого стану і вологості деревини в тепломасообмінних процесах сушіння. //Науковий вісник НЛТУ України. 2018.-№28(10), с. 81-84. DOI: 10.15421/40281017
2. Kudra T. Advanced drying technologies / T. Kudra, A.S. Mujumdar. - New York, Basel: Marcel Dekker, Inc., 2002. - 472 p. ISBN: 0-8247-9618-7.
3. Білей П.В., Кулешник Я.Ф., Соколовський І.А. Принципи побудови режимів сушіння деревини. //Науковий вісник НЛТУ України. - 2001, №11.2, с. 57-59.
4. Golisz E., Jaros M., Glowacki S. Modelling of biomass temperature in the drying process. E3S Web Conf. 2020, 154-1004. DOI: 10.1051/e3sconf/202015401004
5. Воронов В.Г., Качанов П.А., Рогачёв А.И. Разработка алгоритма оптимального управления процессом нагрева при сушке капиллярно-пористых материалов // Труды Всесоюзной конференции «Актуальные направления развития сушки древесины». – Архангельск: ЦНИИМОД, 1980. – с. 232-239.
6. Качанов П.А., Рогачёв А.И. К вопросу реализации оптимального управления процессами сушки капиллярно-пористых материалов. // Вестник «ХПИ», 1981. - №179. – с. 44-46.
7. Elsisli M. Design of neural network predictive controller based on imperialist competitive algorithm for automatic voltage regulator //Neural Computing and Applications 2019 31(4):1-11. DOI:10.1007/s00521-018-03995-9
8. Рогачёв А.И., Денисенко Н.А. Энергосберегающее управление процессом пропарки при сушке капиллярно-пористых материалов //Вісник НТУ «ХПИ», збірник наукових праць. Тематич. випуск Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХПИ». 2007. - №36. - с.9-15

Received (Надійшла) 23.06.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.08.2022

Simulation of a drying system using a neural controller

Anatoly Gapon, Mykola Denysenko, Andrey Zuev, Natalia Yevsina

Abstract. The process of wood drying as the main capillary-porous material is considered. The research **purpose** is to consider the method of optimizing the drying processes of capillary-porous materials, including wood drying and modeling the temperature in the middle of the material using a neural controller. The mathematical model of the control object was defined as a batch camera, which is the most favorable for use in logging companies and as one that has good economic performance. An analysis was made of existing technical solutions on this topic. The settings and identification procedure of the neural controller used in this task are shown. Modeling of the optimal temperature from 0 to 100 degrees of Celsius is considered. According to the **results** of the study it is shown that this method is applied to different classes of controlled processes.

Keywords: drying chamber, capillary-porous materials, neural controller, control system, mathematical model, control object.