

М. А. Денисенко, А. О. Зуєв, Н. О. Євсіна, В. М. Лещенко

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

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ СУШІННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГНОЗУЮЧОЇ МОДЕЛІ

Анотація. Розглянуто процес сушіння капілярно-пористих матеріалів в сушильних камерах періодичної дії. **Метою** статті є оптимізація процесів сушіння капілярно-пористих матеріалів - твердих тіл, що містять велику кількість порожнеч, характерний розмір яких дуже малий у порівнянні з характерним розміром тіла, прикладом таких тіл може бути цегла, бетон та деревина. Було обрано сушильну камеру періодичної дії, яка дозволяє більш якісно та гнучко встановлювати режими сушіння з метою досягнення найбільш оптимальних параметрів, за рахунок помірною об'єму камери періодичної дії дозволяють досягти найменших показників відсоткового вмісту вологи, тим самим матеріал набуває додаткових фізичних властивостей і стає більш стійким до подальшого руйнування. Проведено аналіз існуючих технічних рішень за даною тематикою. Розглянуто вирішення завдань оптимізації із застосуванням прогнозуючої моделі. За **результатами** дослідження отримані графіки перехідних процесів при обмеженому управлінні та швидкості прогріву.

Ключові слова: капілярно-пористі матеріали, система управління, прогнозуюча модель, оптимізація, об'єкт управління.

Вступ

Сьогодні найчастіше саме в сушильних камерах відбувається сушіння капілярно-пористих матеріалів. Сушіння відбувається відповідно до відомих всіх законів фізики. Чим швидше до матеріалу надходить енергія, необхідна випаровування рідини, тим швидше він сохне [1]. Існує кілька видів сушильних камер, але в даній роботі розглядається сушильна камера періодичної дії. Ці камери значно коротші за інші та під час сушіння у всій камері підтримуються постійні параметри середовища. У такій камері матеріал можна сушити до будь-яких необхідних кінцевих вологостей [2]. На даний момент обладнання сушильних камер оснащено автоматичними системами контролю вологості, управління вентиляцією тощо. Такі сушильні камери витрачають на 20% менше енергії.

Огляд існуючих технічних рішень. Одними з перших регуляторів були ПІ- та ПІД-контролери. Вони довели свою ефективність в управлінні різноманітними процесами. Використання таких контролерів не вимагає знання точної моделі процесу, тому вони ефективні в управлінні промисловими процесами, математичні моделі яких досить складні. ПІ- та ПІД-контролери будуються на основі класичної теорії управління та прості для розуміння. Встановлення зв'язків між параметрами та управління діями системи можуть здійснюватися інженерами-практиками та операторами. Крім того, за останні десятиліття розроблено кілька методів налаштування ПІ- та ПІД-контролерів. Зіглер і Нікольс запропонували метод налаштування, заснований на даних про реакцію на одиничний ступінчастий вплив. Він широко використовувався протягом багатьох років і виявився досить ефективним. На його основі Такахаші та інші запропонували метод налаштування для ПІ- та ПІД-контролерів з дискретним часом. Більш сучас-

ний спосіб автоматичного налаштування ПІ- та ПІД-контролерів був запропонований Нішикавой в [3]. Він вимагає подачі вхідного випробувального сигналу для оцінки параметрів процесу. Оптимальні значення ПІ- та ПІД-параметрів досягаються шляхом мінімізації зваженого інтеграла квадратичної помилки. Однак, поряд з вищезазначеними перевагами, ПІ- та ПІД-контролери мають і ряд недоліків. Так, якщо робоча точка процесу змінюється, параметри контролера потрібно перенастроювати вручну, щоб отримати нове оптимальне налаштування. Налаштування має виконуватися досвідченим оператором. Для систем із взаємодіючими контурами ця процедура може бути складною та займати багато часу.

Одним із сучасних підходів до аналізу та синтезу систем управління, що базуються на математичних методах оптимізації, є теорія управління динамічними об'єктами з використанням прогнозуючих моделей – Model Predictive Control (MPC). В [4] дуже гарно описується алгоритм цього метода, але погано показана реалізація метода саме на конкретних прикладах, в тому числі в системах управління.

Метою статті є оптимізація процесу пропарювання при сушінні капілярно-пористих матеріалів з використанням прогнозуючих моделей. При цьому розглянуто вирішення цього завдання шляхом вибору різних критеріїв оптимальності та можливості їхньої технічної реалізації.

Метод прогнозуючих моделей – Model Predictive Control (MPC)

Цей підхід почав розвиватися на початку 60-х років для управління процесами та обладнанням у нафтохімічному та енергетичному виробництві, для яких застосування традиційних методів синтезу було вкрай утруднене у зв'язку з винятковою складністю їх математичних моделей. Ідея оптимізації прогнозованого програмного руху, що є основою MPC-

методів, виникла в рамках двох незалежних, однак близьких по суті підходів. Перший з них, що називається Dynamics Matrix Control (DMC), розвивався зусиллями фахівців компанії Shell Oil у середині 60-х років, а другий – Model Algorithmic Control (MAC) – був розроблений французькими інженерами хімічної промисловості в кінці 60-х. На основі останнього підходу вперше було створено комерційний пакет програм IDCОM (Identification and Command), який певною мірою послужив прообразом сучасної програмної підтримки методів керування з прогнозом. Нині MPC-метод перебуває у стадії інтенсивного розвитку, що свідчить велика бібліографія опублікованих останні роки наукових праць, присвячених даній проблематиці, зокрема в [5] дуже якісно побудована модель управління з прогнозуванням, показана стабільна робота такого об'єкта, але треба багато кроків для оптимізації процесу, що може бути недоліком. Сфера практичного застосування суттєво розширилася та охоплює технологічні процеси в хімічній [6] та будівельній індустрії, легкій та харчовій промисловості [7], в аерокосмічних дослідженнях, у сучасних системах енергетики тощо. Розвиток ідей управління з прогнозуванням відбувається у напрямі використання нелінійних моделей, забезпечення стійкості за Ляпуновим контрольованих рухів, надання робастних властивостей замкнутій системі управління, застосування сучасних оптимізаційних методів у реальному масштабі часу. Основною перевагою MPC-методу, що визначає його успішне використання в практиці побудови та експлуатації систем управління, є відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку, що поєднується з високими адаптивними властивостями. Остання обставина дозволяє керувати багатови-

мірними та багатозв'язаними об'єктами зі складною структурою, що включає нелінійності, оптимізувати процеси в режимі реального часу в рамках обмежень на керуючі та керовані змінні, враховувати невизначеність у завданні об'єктів та обурень. Крім того, можливий облік транспортного запізнення, облік змін критеріїв якості під час процесу та відмов датчиків системи вимірювання. Принцип MPC-методу становить таку схему управління динамічними об'єктами за принципом зворотний [4]:

1. Розглядається деяка (щодо проста) математична модель об'єкта, початковими умовами для якої є його поточний стан. При заданому програмному управлінні виконується інтегрування рівнянь цієї моделі, що дає прогноз руху об'єкта на певному кінцевому відрізку часу (горизонт прогнозу).

2. Виконується оптимізація програмного управління, метою якого є наближення регульованих змінних прогнозуючої моделі до відповідних сигналів на горизонті прогнозу. Оптимізація здійснюється з урахуванням всього комплексу обмежень, накладених на управляючі та регульовані змінні.

3. На кроці обчислень, що становить фіксовану малу частину горизонту прогнозу, реалізується знайдене оптимальне управління та здійснюється вимірювання (або відновлення за вимірюваними змінними) фактичного стану об'єкта на кінець кроку.

4. Горизонт прогнозу зсувається на крок уперед і повторюються пункти 1 - 3 даної послідовності дій.

5. Описана схема та принцип цього методу показано на рис. 1.

Об'єкт керування — сушильна камера періодичної дії, структурна схема якої зображена на рис. 2 [7].

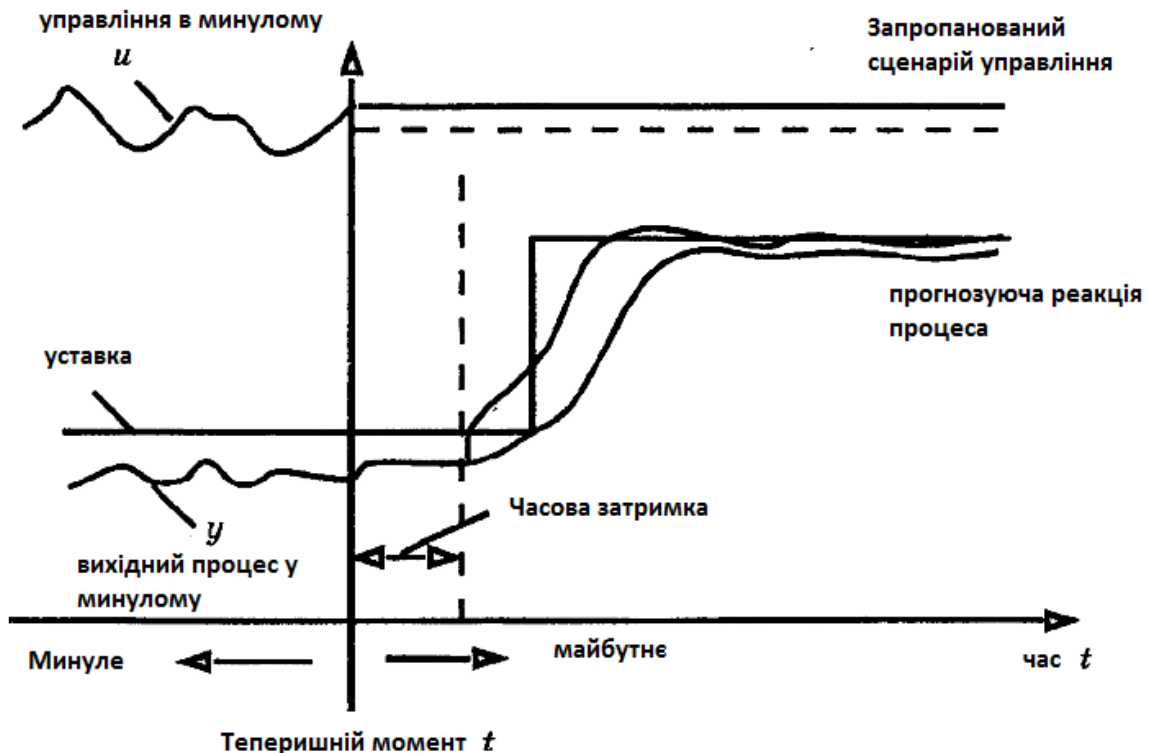


Рис. 1. Схема керування на основі прогнозування

Передавальній функція об'єкта управління може бути записана у такому вигляді [8]:

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

Згідно з наведеним методом MPC візьмемо за поточну (просту модель) передавальну функцію, що характеризує аперіодичну ланку другого порядку, в знаменнику якої буде добуток двох перших дужок з (1). Горизонт прогнозу візьмемо невеличкий інтервал часу, наприклад [0,0.5] та зробимо моделювання в системі Simulink для процесу з наступними параметрами [8]:

$$k_1 = 130, k_2 = 0.61, k_3 = 1, k_4 = 40, k_5 = 2, k_{mc} = 0.61, k_{cm} = 0.61, T_1 = 1.12, T_2 = 1.17, T_3 = 2.33,$$

$$T_4 = 0.33, T_5 = 0.83, T_6 = 1.84, T_{21} = 1.271.$$

На основі даної математичної моделі та із застосуванням зазначеного метода отримаємо наступні графіки зміни температури та вологості (рис. 3, 4):

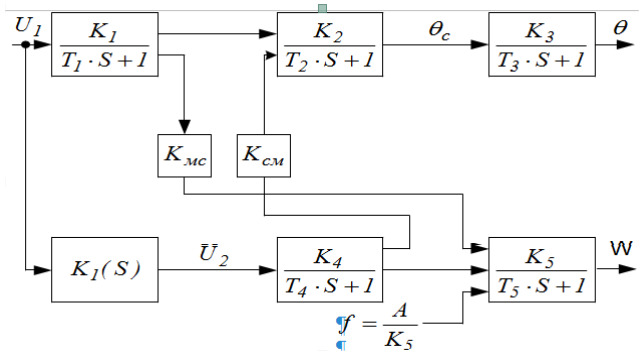


Рис. 2. Структурна схема об'єкта управління

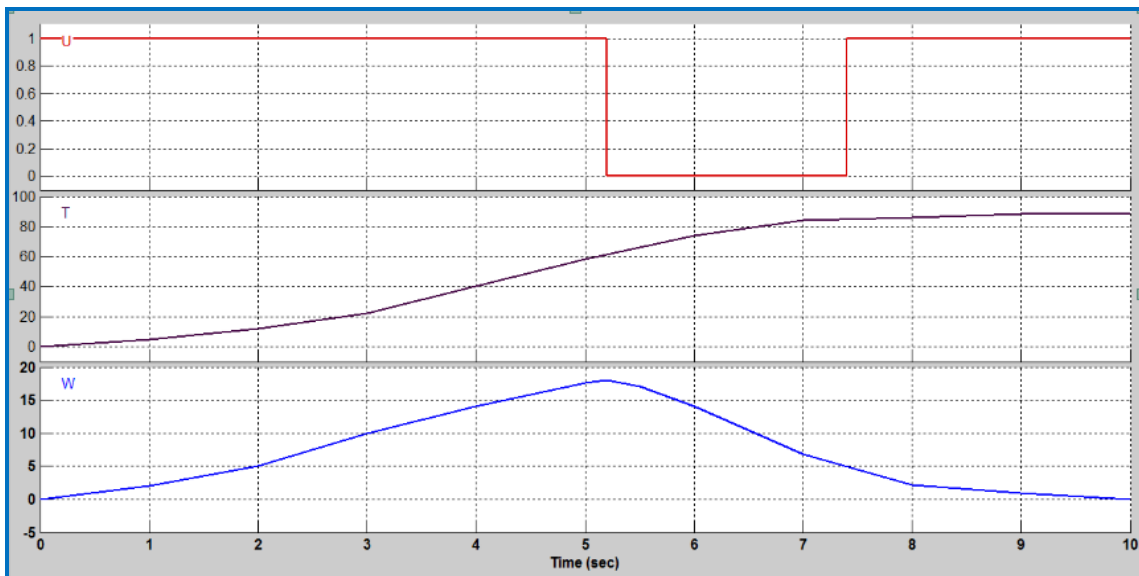


Рис. 3. Перехідні процеси при обмеженому управлінні

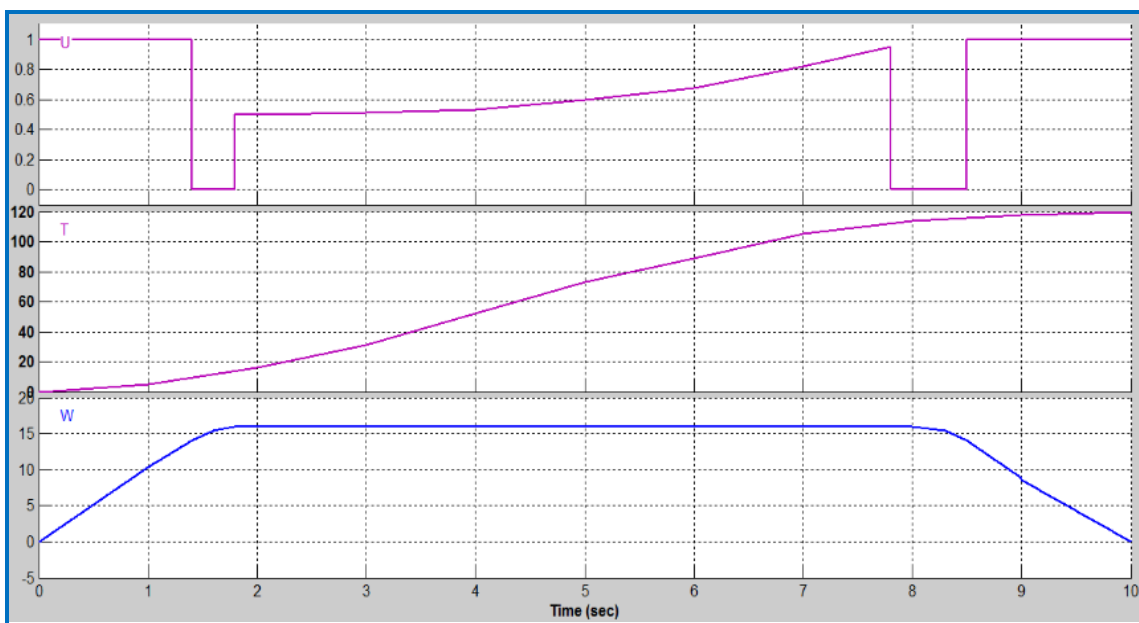


Рис. 4. Перехідні процеси при обмеженому управлінні та швидкості прогріву

Наведені графіки перехідного процесу дуже близькі до отриманих іншим методом в [9], але в цьому випадку температура змінюється більш плавно, хоча регулюється не так швидко, як в [10], змі-

нюючи інтервал часу зі зменшеним кроком можливо досягти ще більшої швидкодії (табл. 1). Це цілком доводить правильність вибору математичної моделі та прогнозування.

Таблиця 1 – Порівняння швидкодії при різних обмеженнях

Горизонт прогнозу	Швидкодія при обмеженому управлінні, с.	Швидкодія при обмеженому управлінні та швидкості прогріву, с.
[0,0,5]	5	5,2
[0,0,4]	4,97	5,1
[0,0,3]	4,92	5,05
[0,0,2]	4,84	5
[0,0,1]	4,71	4,98

Висновки

1. Визначення сушильної камери та обрання правильного методу управління є найбільш ефективним та практичним інструментом на сьогоднішній день.

2. Проведений аналіз методів оптимізації процесу управління та розглянутий метод управління за допомогою прогнозуючих моделей, який найбільш

повно порівняно з ПІ- та ПІД-управлінням дозволяє оптимізувати процеси, у тому числі, в режимі реального часу в рамках обмежень на змінні, що управляються.

3. Отримані графіки перехідних процесів при обмеженому управлінні та швидкості прогріву, які цілком доводять успішність застосування цього методу на практиці.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Sokolovskyy, I., Ozarkiv, I., & Kobrynovych, M. (2015). Теоретичні дослідження кінетики та динаміки процесу сушіння капілярно-пористих колоїдних матеріалів. //Науковий вісник НЛТУ України, 2015. -25(9), 351-355. <https://doi.org/10.15421/40250954>.
- Личагин Б.І., Личагин І.М. Сушильна камера періодичної дії з подвійними поздовжніми стінами для висушування пиломатеріалів //Науковий вісник НЛТУ України. - 2008. №18.3, с. 146-148.
- Nishikawa, Y. N Sanomiya, T. Ohta, and H. Tanaka, «A method for auto-tuning of PID control parameters», Automatica, Vol. 20, pp. 321-332, 1984.
- Bemporad A., Borrelli F., Morari M. Model predictive control based on linear programming – The explicit solution // IEEE transactions on automatic control. 2002. Vol. 47. No 12. P. 1974–1985.
- Mayne D.Q., Rawlings J.B., Rao C.V., Sokaert. Constrained model predictive control: Stability and optimality //Automatica. – 2000. – Vol. 36. – P. 789-814..
- Diez E., Meyer K., Buck A., Tsotsas E., Heinrich S. Influence of process conditions on the product properties in a continuous fluidized bed spray granulation process // Chemical engineering research and design. – 2018. – Vol. 139. – P. 104-115. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.09.032>.
- Gao X., Wang J., Wang S., Li Z. Modeling of drying kinetics of green peas by reaction engineering approach / X. Gao [et al.] // Drying Technology. – 2016. – Vol. 34, No 4. – P. 437-442. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1060491>.
- Anatoly Garon, Mykola Denysenko, Andrey Zuev, Natalia Yevsina // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2022. – Т. 3 (69). – С. 18-21. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.3.018>.
- Качанов П.А., Рогачёв А.И., Супрунова С.П. Оптимальное управление процессом сушки при ограничении скорости нагрева // Вестник Харьковского политехнического института. – Харьков: ХГУ, 1984. – Вып.10. - №210. – С.16-18.
- Рогачёв А.И., Денисенко Н.А. Энергосберегающее управление процессом пропарки при сушке капиллярно-пористых материалов //Вісник НТУ «ХПІ», збірник наукових праць. Тематич. випуск Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХПІ». 2007. - №36. - с.9-15.

Received (Надійшла) 22.08.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.10.2022

Optimization system of drying using a prediction model

Denysenko Mykola, Zuev Andrey, Yevsina Natalia, Leshchenko Viacheslav

Abstract. The process of drying capillary-porous materials in drying chambers is considered. The research **purpose** is to optimize the drying of capillary-porous materials - solids with a large number of voids, which are very small in size compared to the typical size of the body, examples of such bodies are brick, concrete and wood. There was a drying chamber of the selected action, which allows you to more efficiently and flexibly set the optimal drying parameters to achieve the best parameters, due to the moderate volume of the chamber. more resistant to further destruction. The analysis of existing technical solutions on this topic is carried out. The problem of optimization with the use of predictive models is considered. According to the **results** of the study of the obtained graphs of transients with limited control and heating rate.

Keywords: capillary-porous materials, control system, predictive model, optimization, control object.