

М.О. Федотова, Д.В. Трушаков, І.А. Березюк, І.О. Скриннік, Р.С. Заворуєв

ЕТАПИ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ СУШАРКИ З КИПЛЯЧИМ ШАРОМ

Анотація. Киплячий шар - прогресивний спосіб сушіння дрібнодисперсних матеріалів. Він забезпечує інтенсивний тепломасообмін, що дозволяє досягти високої продуктивності. Впровадження автоматизованих систем керування (АСК) відіграє ключову роль у досягненні стабільності технологічних процесів. У той же час сам киплячий шар є динамічною системою, де поведінка матеріалу залежить від багатьох факторів, таких як швидкість повітря, розмір частинок, вологість і температура. Це робить контроль процесу складним, оскільки навіть невеликі зміни в одному параметрі можуть призвести до значних змін в інших через наявні перехресні зв'язки. Дана робота є узагальненням в плануванні методики синтезу АСК процесом сушіння насіння соняшника у зерносушарці з киплячим шаром, що являє собою складний динамічний багатовимірний об'єкт із запізненням. Причому етапи синтезу враховують особливості конструкції сушарки, її роботу у різних режимах, зокрема у режимі стабілізації та ситуацію з неможливістю виміряти вихідні сигнали об'єкта у повній мірі. Всі етапи синтезу АСК процесом сушіння у сушарці з киплячим шаром побудовані на застосування базових принципів сучасної теорії автоматичного керування складними технологічними процесами.

Ключові слова: сушарка, киплячий шар, система автоматичного керування, структурна схема, багатовимірність, матриця передаточних функцій, випереджувач Сміта.

Постановка проблеми. Сушіння в киплячому шарі має низку переваг, які роблять цей спосіб ефективним для обробки різних матеріалів. До переваг слід віднести в першу чергу: високу швидкість сушіння, рівномірність сушіння, високу теплову ефективність, можливість роботи з дрібнодисперсними матеріалами, безперервність процесу, контроль температури, простоту конструкції. Ці особливості роблять сушіння в киплячому шарі привабливим для широкого спектра застосувань, включаючи харчову, хімічну, фармацевтичну та інші галузі промисловості. Абсолютно всі технологічні процеси наразі автоматизовані, що вимагає ретельного планування та управління, адже важливо враховувати потенційні виклики та ризики. Успішне впровадження автоматизації вимагає комплексного підходу, який включає технологічні, організаційні та людські аспекти. Киплячий шар – це динамічна система, де поведінка матеріалу постійно змінюється під впливом різних параметрів, що ускладнює синтез САК таким процесом. Основними перешкодами у синтезі АСК є в першу чергу наявність перехресних

зв'язків між всіма технологічними параметрами процесу, особливо це кореляція між швидкість повітря, температурою та кінцевою вологістю матеріалу, що на пряму залежить від висоти матеріалу на каскадах-решетах. Тому це вимагає використання складних алгоритмів керування та моделей процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел [1, 2, 3] наводить на думку, що існуючі АСК процесом сушіння в киплячому шарі не враховують перехресні зв'язки між вхідними-вихідними параметрами об'єкта. Одночасно, відомі математичні моделі об'єкта керування вказують на те, що такі сушарки належать до множини багатовимірних нелінійних динамічних об'єктів з розподіленими параметрами та чистим запізненням.

Дослідження багатьох вчених доводять, що при фіксованих конструкції об'єкта керування та датчиків вимірювальної інформації точність стабілізації в однакових експлуатаційних умовах визначається структурою та параметрами матриць передаточних функцій каналів керування. Досягнення найвищої точності стабілізації при обмежених ресурсах керування можливе лише в оптимальних системах, структура та параметри законів керування якими визначені в результаті мінімізації квадратичного критерію якості, який враховує характеристики похибки стабілізації та зміни сигналів керування.

Мета дослідження. За відомою конструкцією об'єкта та вимірними вхідними-вихідними сигналами необхідно синтезувати таку автоматизовану систему керування процесом сушіння, яка б забезпечувала не лише стабільність та стійкість процесу, а й гарантувала мінімізацію витрати енергоносіїв з одночасним збереженням якісних показників вихідної продукції.

Викладення основного матеріалу дослідження. Процес сушіння насіння соняшника у зерносушарці відбувається в сталому режимі [4], що становить близько 90% часу роботи сушарки. І у цьому режимі дуже важливо те, щоб вихідні сигнали об'єкта відповідали заданим значенням. Підвищення ефективності сушіння вимагає оптимізації роботи регуляторів в режимі стабілізації.

Вважаємо, що один з вхідних технологічних параметрів T (температура теплоносія) стабільна досить точно за допомогою регуляторів; насіння рухається по каскадах згори вниз зі швидкістю, що дорівнює $const$; математична ймовірність висоти киплячого шару h та вологості матеріалу w на виході зерносушарки відповідають значенню, що задане. В такому разі багатовимірний об'єкт з розподіленими параметрами (зерносушарку) пропонується замінити сукупністю n лінійних об'єктів з зосередженими параметрами (n – кількість каскадів зерносушарки). Для цього введена прямокутна система координат XOY (рис. 1.) [5].

Початок цієї системи координат зв'язаний із заданим значенням положенням шибєру 3. Вісь OX направлена вздовж руху шибєру праворуч, а вісь OY – співпадає з конструктивною віссю сушарки за напрямком руху зерна. Положення об'єкту з номером k у визначеній системі координат характеризується вектором координат центру мас k -того каскаду, який дорівнює

$$x = (x_k, y_k), \quad (1)$$

де x_k – проекція центру мас каскаду k на вісь OX ($x_k = 0$); y_k – проекція центру мас каскаду k на вісь OY , яка з урахуванням рис. 1. визначена у вигляді $y_k = k \cdot \Delta$ (Δ – відстань між каскадами, м).

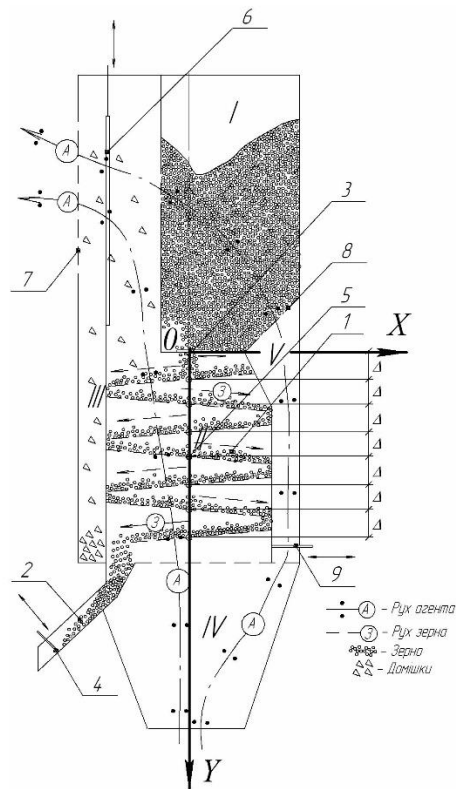


Рисунок 1 – Зерносушарка каскадного типу для сушіння насіння соняшника у киплячому шарі з прямокутною системою координат XOY

Вважаємо, що стабілізація висоти h_k киплячого шару на каскаді з номером k та зміна вологості матеріалу w на виході зерносушарки відбувається за рахунок коливання шибера навколо середнього значення S_h та зміни температури теплоносія відносно середнього значення T_7 біля каскаду з номером 7.

Процесу стабілізації заважають неконтрольовані збурення, які утворюють вектор ψ_k . В такому разі на входах k -того об'єкту діють двомірний вектор сигналів керування u_k та двовимірний вектор збурень ψ_k , динаміка якого невідома [6]. На виході k -того об'єкта діє вектор вихідних сигналів x_k вигляду

$$u_k = \begin{bmatrix} S_h \\ T_7 \end{bmatrix}; \quad x_k = \begin{bmatrix} h_k \\ w \end{bmatrix} \quad (2)$$

Основний матеріал. Враховуючи вищезазначене, модель динаміки зерносушарки з киплячим шаром для сушіння дисперсного матеріалу у режимі стабілізації, що врахо-

вус особливості конструкції, буде складатися з n систем звичайних диференціальних рівнянь, які мають вигляд типу:

$$P_k x_k = M_k u_k + \psi_k \quad (3)$$

де P_k – поліноміальна матриця розміру 2×2 , елементи якої є поліномами від оператора диференціювання $p = d/dt$ (k – номер каскаду)

M_k – поліноміальна матриця розміру 2×2 .

Припустимо також, що доступним для вимірювання в процесі є значення відхилення одного з вихідних технологічних параметрів об'єкта, а саме вологість матеріалу w від її математичного сподівання.

Відповідно методиці, що подана у монографіях [7, 8], доцільно скористатися структурною схемою системи стабілізації, на основі якої складемо таку, яка відповідає вимогам та особливостям складного багатовимірного об'єкта з розподіленими параметрами із запізненням (рис. 2). На входах такої структурної схеми діють вектори сигналів збурень та шумів вимірювання вологості на виході сушарки ϕ , точки впливу яких на систему не співпадають.

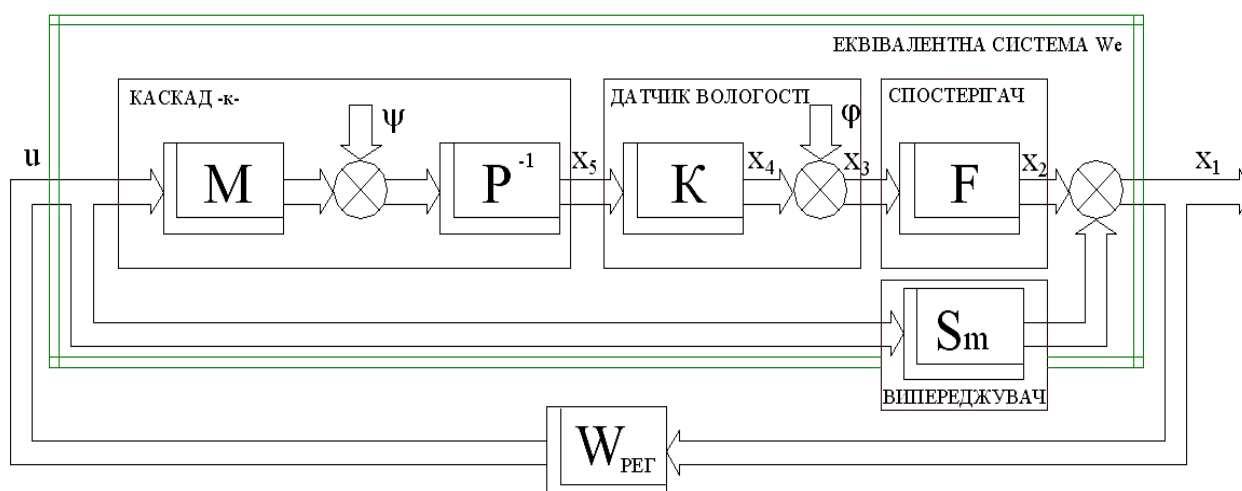


Рисунок 2 – Структурна схема системи автоматичного регулювання технологічних параметрів сушарки з киплячим шаром за неповними вимірами

Вектор сигналів на виході системи x_1 характеризує зміну висоти киплячого шару каскаду з номером k та вологості на виході об'єкта. Цей вектор складається як сукупність векторів сигналів на виходах спостерігача з матрицею передаточних функцій F_k та випереджувача S_m , опис якого визначається передаточною функцією S_m . Спостерігач F_k призначений для обчислення оцінок змін висоти киплячого шару на каскаді k та вологості w за сигналом від неідеального датчика вологості з передаточною функцією K .

Випереджувач S_m [9] призначений для компенсації запізнення в реакціях об'єкта x_k на зміну керуючих впливів u_k . Зворотній зв'язок в системі стабілізації зами-

кається за допомогою регулятора з передаточною функцією $W_{PEГ}$. Входом якого є вектор x_l , а виходом – вектор сигналів керування u_k .

Дослідження багатьох вчених довели, що при незмінній конструкції об'єкта керування та засобів вимірювання інформації ефект стабілізації в однакових експлуатаційних умовах визначається структурою та параметрами матриць передаточних функцій каналів зв'язку. Досягнення найвищої точності стабілізації при обмежених ресурсах керування можливе лише у оптимальних системах, структура та параметри законів керування якими визначені в результаті мінімізації квадратичного критерію якості, який враховує характеристики похибки стабілізації та зміни сигналів керування.

Таким чином, якщо взяти до уваги прийняті припущення, то загальне завдання дослідження полягає у наступному. За відомою конструкцією дослідного зразку об'єкта (рис. 1.) та вимірними даними про вхідні (зміна положення завантажуючого шибєру S_h ; температури агента T) та вихідні (зміна висоти матеріалу на кожному з семи каскадів h_k ; та кінцевої вологості w матеріалу) сигнали сушарки, знайти опис динаміки об'єкта керування та збурень, що діють на нього в сталому режимі; розробити структуру та параметри оптимальних передаточних функцій спостерігача F_k , регулятора $W_{PEГ}$, а також випереджувача Сміта S_m ; оцінити ефект від застосування синтезованої системи автоматичного регулювання вихідних сигналів сушарки

Висновки. Аналіз конструкцій сушарок каскадного типу з киплячим шаром, особливостей розробки та функціонування регуляторів, які застосовують для автоматизації процесів керування сушінням у них, дозволив виділити основні причини, що заважають ефективному процесу сушіння:

- структура системи керування процесом сушіння складається з окремих незалежно працюючих регуляторів, в той час, як експериментальна сушарка є багатовимірним об'єктом керування з розподіленими параметрами та чистим запізненням, що функціонує в умовах дії випадкових збурень та завад;

- модель об'єкта керування, покладена в основу розробки вже відомих систем, не враховує перехресні зв'язки в об'єкті керування, чисте запізнення та випадковий характер збурень, які супроводжують процес стабілізації висоти киплячого шару.

Для подолання зазначених недоліків запропоновано представити сушарку в режимі стабілізації у вигляді множини лінеаризованих багатовимірних об'єктів керування з чистим запізненням, на які діють стаціонарні випадкові збурення, та здійснити синтез оптимальної системи стабілізації на основі експериментально-аналітичного методу, суть якого ілюструє схема на рис. 2. Першим етапом використання зазначеного методу - є розробка методик розв'язання часткових задач дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Енергоефективні технології та техніка сушіння харчової сировини : навч. посібник / М. І. Погожих, В. О. Потапов, А. О. Пак, М. В. Жеребкін. – Х. : ХДУХТ, 2016. – 234 с.
2. Кондратець В.О. Автоматика та автоматизація виробництва с-г машин. у 2-х ч. [Текст] : підручник для студентів вузів. Ч.1 . Теорія і технічні засоби систем / В. О. Кондратець. - К. : Вища школа, 1993. - 319

3. Станкевич Г.М. Сушіння зерна: Підручник / Г.М. Станкевич, Т. Страхова, В.І. Атаназевич – К.: Либідь, 1997. – 352 с.
4. Федотова М.О. Автоматизація процесу стабілізації висоти киплячого шару насіння у зерносушарці за неповними вимірами: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.13.07. Кропивницький, 2017. 276 с.
5. Монографія/ Федотова М.О., Скриннік І.О., Дарієнко В.В. Автоматизація процесу сушіння дисперсного матеріалу в киплячому шарі Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga, Latvia : «Baltija Publishing», 2022. 554 p. [<http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/217/5995/12512-1>]
6. Трушаков Д. Козловський О., Рендзіняк С., Коруд В., Федотова М Автоматизована система фільтрації завод під час вимірювання температури сушильної шафи. Електроніка та інформаційні технології. 2021. Випуск 15. С. 80–89 Electronics and information technologies. 2021. Issue 15. P. 80–89 [<http://elit.lnu.edu.ua/en/15/8.html>]
7. Азарсков В.Н. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации / В.Н. Азарсков, Л.Н. Блохин, Л.С. Житецкий, – монография. К.: НАУ, 2006.– 438 с.
8. Основи сучасної теорії управління: Навч посібник / А.А. Тунік, О.О. Абрамович . – К.: НАУ, 2010. – 260 с.
9. O. J. M. Smith. A controller to overcome dead-time. ISA Transactions, 6 (2):28–33, 1959.

REFERENCES

1. Enerhoefektyvni tekhnolohii ta tekhnika sushinnia kharchovoi syrovyny : navch. posibnyk / M. I. Pohozhykh, V. O. Potapov, A. O. Pak, M. V. Zherebkin. – Kh. : KhDUKht, 2016. – 234 s.
2. Kondratets V.O. Avtomatyka ta avtomatyzatsiia vyrobnytstva s-h mashyn. u 2-kh ch. [Tekst] : pidruchnyk dlia studentiv vuziv. Ch.1 . Teoriia i tekhnichni zasoby system / V. O. Kondratets. - K. : Vyshcha shkola, 1993. - 319
3. Stankevych H.M. Sushinnia zerna: Pidruchnyk / H.M. Stankevych, T. Strakhova, V.I. Atanazevych – K.: Lybid, 1997. – 352 s.
4. Fedotova M.O. Avtomatyzatsiia protsesu stabilizatsii vysoty kypliachoho sharu nasinnia u zernosushartsi za nepovnymy vymiramy: dysertatsiia na zdobuttia naukovooho stupenia kandydata tekhnichnykh nauk: 05.13.07. Kropyvnytskyi, 2017. 276 s.
5. Monohrafiia/ Fedotova M.O., Skrynnik I.O., Dariienko V.V. Avtomatyzatsiia protsesu sushinnia dyspersnoho materialu v kypliachomu shari Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga, Latvia : «Baltija Publishing», 2022. 554 p. [<http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/217/5995/12512-1>]
6. Trushakov D. Kozlovskiy O., Rendziniak S., Korud V., Fedotova M Avtomatyzovana sistema filtratsii zavod pid chas vymiriuvannia temperatury sushylnoi shafy. Elektronika ta informatsiini tekhnolohii. 2021. Vypusk 15. S. 80–89 Electronics and information technologies. 2021. Issue 15. P. 80–89 [<http://elit.lnu.edu.ua/en/15/8.html>]

7. Azarskov V.N. Metodolohyia konstruivannya optymalnykh system stokhastycheskoi stablyzatsyy / V.N. Azarskov, L.N. Blokhyn, L.S. Zhytetskyi, – monohrafiya. K.: NAU, 2006.– 438 s.
8. Osnovy suchasnoi teorii upravlinnia: Navch posibnyk / A.A. Tunik, O.O. Abramovych . – K.: NAU, 2010. – 260 s.
9. O. J. M. Smith. A controller to overcome dead-time. ISA Transactions, 6 (2):28–33, 1959.

Received 28.04.2025.

Accepted 30.04.2025.

Stages of synthesis of the automatic control system of a fluidized bed dryer

Fluidized bed is one of the most effective methods of drying dispersed materials, which provides intensive heat and mass transfer and allows achieving high productivity with minimized energy costs. Due to the intensive contact between the material and the drying agent, the drying process in such installations occurs very quickly. The undeniable advantages of this method are: high drying speed, its uniformity due to the correct distribution of heat and moisture, which prevents overdrying or underdrying. This method is suitable for drying a wide range of materials, including powders, granules, crystals and other finely dispersed materials. In fluidized bed dryers, it is quite easy to control temperature, air velocity and other process parameters, which allows you to achieve optimal results. And because the material is in a suspended state, the risk of mechanical damage is reduced. These advantages make fluidized bed drying an important process in many industries, including food, pharmaceutical, chemical and others. The implementation of automated control systems (ACS) plays a key role in achieving process stability. At the same time, the fluidized bed itself is a dynamic system where the behavior of the material depends on many factors, such as air velocity, particle size, humidity and temperature. This makes process control difficult, as even small changes in one parameter can lead to significant changes in others due to existing cross-links. This work is a generalization in the planning of the ASA synthesis method by the process of drying sunflower seeds in a fluidized bed grain dryer, which is a complex dynamic multidimensional object with a delay. Moreover, the stages of synthesis take into account the design features of the dryer, its operation in various modes, in particular in the stabilization mode, and the situation with the impossibility of measuring the output signals of the object in full. All stages of the synthesis of ACS by the drying process in a fluidized bed dryer are built on the application of the basic principles of the modern theory of automatic control of complex technological processes.

Федотова Маріанна Олександрівна - к.т.н., асистент кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет.

Трушаков Дмитро Володимирович - к.т.н., асистент кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет.

Березюк Ірина Анатоліївна - к.т.н., асистент кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет.

Скриннік Іван Олександрович - к.т.н., доцент кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет.

Заворуєв Роман Сергійович - аспірант кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет.

Fedotova Marianna Oleksandrivna - Ph.D., Assistant Professor, Department of Automation of Production Processes, Central Ukrainian National Technical University.

Trushakov Dmytro Volodymyrovych - Ph.D., Assistant Professor, Department of Automation of Production Processes, Central Ukrainian National Technical University.

Berezyuk Iryna Anatoliivna - Ph.D., Assistant Professor of the Department of Automation of Production Processes, Central Ukrainian National Technical University.

Skrynnik Ivan Oleksandrovyh - Ph.D., Associate Professor of the Department of Construction, Road Machinery and Construction, Central Ukrainian National Technical University.

Zavoruyev Roman Serhiyovych - postgraduate student of the Department of Automation of Production Processes, Central Ukrainian National Technical University.