

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛТАВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЗАХАРЧЕНКО РУСЛАН ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 681.51:631.365:633.1

ДИСЕРТАЦІЯ

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ
СУШІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування
Галузь знань 14 – Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Р.В. Захарченко

Науковий керівник
Сільвестров Антон Миколайович
доктор технічних наук, професор

Полтава — 2019

АНОТАЦІЯ

Захарченко Р.В. Автоматизована система керування процесом сушіння зернових культур. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка МОН України. – Центральноукраїнський національний технічний університет, Міністерство освіти і науки України, Кропивницький, 2019.

У дисертаційній роботі запропоновано новий підхід до вирішення проблеми сушіння зернових культур, що полягає у створенні адаптивної оптимальної системи автоматичного керування процесом сушіння, яка дозволяє отримати кондиційне зерно для якісного подальшого зберігання.

В першому розділі проведений аналіз властивостей зерна як об'єкта сушіння, розглянуті експериментальні закономірності процесу сушіння зерна, режими та методи його сушіння.

За результатами аналізу в першому розділі встановлено, що термостійкість зерна характеризується максимальною температурою нагрівання, за якої забезпечується повне зберігання всіх якісних показників зерна. Межа нульового ступеня денатурації білків покладена в основу вибору режиму сушіння зерна. Особлива увага приділяється зрілості зерна. Оболонки свіжозібраного зерна, як ендосперм і зародок, ще недостатньо затверділи і вологопровідна здатність їх знижена. У зв'язку з цим термостійкість такого зерна знижується порівняно із зерном, що пройшло післязбиральне дозрівання. Щоб зберегти якість свіжозібраного зерна, його сушать, використовуючи знижені температуру агента сушіння на 20...30°C та температуру зерна на 10°C.

Із численних методів теплового сушіння найпоширенішим є конвективний, за якого тепла енергія передається зерну від нагрітого газу. Те, що нагрітий газ водночас виступає як теплоносій та вологовбирач, зумовлює відносну простоту конструкцій конвективних сушарок.

Швидкість сушіння залежить від параметрів агента сушіння (температури, вологості та його швидкості) й визначається умовами зовнішньої дифузії вологи в навколишнє середовище.

Складовою процесу сушіння після нагрівання зерна є його охолодження. У прямооточних сушарках охолодження застосовується на кінцевій стадії сушіння, що пов'язано з необхідністю переведення зерна у рівноважний стан не тільки за вологістю, а й за температурою, з метою його тривалого зберігання. Температура зерна, що виходить із сушарки, може перевищувати температуру зовнішнього повітря не більш як на 10°C .

Режим сушіння зерна являє сукупність певних параметрів агента сушіння та зерна: температури t_1 агента, початкової вологості ω_0 та гранично допустимої температури θ_{cp} нагрівання зерна.

Встановлено, що при сушінні попередньо нагрітого зерна поверхневий градієнт вологовмісту менший, ніж при звичайному конвективному сушінні, тобто зона випаровування розташовується поблизу зовнішньої поверхні матеріалу, до якої волога рухається у вигляді рідини. Це запобігає перегріванню поверхні матеріалу та сприяє зберіганню і поліпшенню якості зерна.

За результатами аналізу властивостей зерна і процесів сушіння, як компроміс по якості та вартості доцільно прийняти за основу створення нової міні-сушарки шахтну прямооточну зерносушарку.

У другому розділі встановлено, що сушіння зерна у шахтній прямооточній зерносушарці описується математичною моделлю з просторовим розподіленням параметрів.

Дослідження статичної моделі сушарки реалізується розв'язуванням рівнянь статистики з врахуванням граничних умов. Отриманий у цьому випадку розв'язок статичної моделі, як гладка функція просторових координат, визначає гладке розподілення визначального параметра вздовж просторових координат, Це дозволяє обмежити кількість первинних перетворювачів, для вимірювання температури та вологості зерна у шахті сушарки.

Виходячи з фізичних основ процесу сушки та структури математичної моделі зерносушарки з трьохмірним розподіленням у просторі параметрів у декартовій системі координат з граничними умовами 3-го роду та гладкості просторового розподілу температури (i , відповідно, вологості) зернової маси, з метою спрощення побудови системи автоматичного керування процесом, доцільно перейти від системи з розподіленими до системи з зосередженими параметрами, представивши її матричною передаточною функцією зв'язку i -х вхідних з j -ми вихідними змінними, які вимірюються у відповідних точках агрегату обмеженою кількістю первинних перетворювачів температури і вологості.

У третьому розділі розроблена структура і алгоритм функціонування багатомірної автономної САК з еталонною моделлю, яка з необхідною якістю відпрацьовує завдання сушіння зерна.

Аналіз графіків моделювання показав, що розроблена система керування задовольняє показники якості при визначених параметрах об'єкта керування. Однак у процесі сушіння параметри зерна змінюються. Це призводить до того, що система не може якісно керувати процесом сушіння (з'являється перерегулювання, збільшується час перехідного процесу) або взагалі стає не керованою. Тому для вирішення даної проблеми потрібно відслідковувати зміну параметрів об'єкта керування. Дану задачу вирішує побудова підсистеми ідентифікації. Доповнення системи автономного оптимального (в сенсі відповідності до еталона) керування сушаркою, як багатомірним об'єктом, підсистемою ідентифікації параметрів прямих і перехресних зв'язків в об'єкті керування, дозволяє створити функціонально надійну САК в умовах нестационарності і стохастичності характеристик об'єкта.

У четвертому розділі використовуючи системний підхід та структуру і алгоритми функціонування багаторазово адаптивної системи ідентифікації побудовано підсистему ідентифікації процесів у сушарці.

Враховуючи не стандартну для використання метода найменших квадратів реальну ситуацію зашумленості як вихідних, та і вхідних змінних об'єкта ідентифікації, в якості оптимального (в сенсі незміщеності і ефективності оцінок

параметрів) був протестований і використаний більш досконалий (ніж МНК) метод мінімізації оптимально взваженої суми симетричних кореляційних функцій.

У результаті використання ІМНК отримані незміщені і ефективні оцінки передаточних функцій сушарки, що дозволили реалізувати оптимальні адаптивні алгоритми автономного керування окремими каналами температури вологості сушарки як багатомірного об'єкта з перехресними зв'язками.

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження розробленої системи автоматичного керування процесом сушіння зернових культур складає 561,7 тис. грн. Термін окупності витрат на виготовлення зерносушарки — 5 місяців.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Набула подальшого розвитку математична модель процесу сушіння з розподіленими і зосередженими, відносно вимірювальної системи, параметрами.

2. Вперше розроблено автономну адаптивну систему керування процесом сушіння зернових культур, яка забезпечує оптимальні режими в умовах невизначеності та нестационарності параметрів об'єкта і середовища.

3. Вперше отримано незміщені та ефективні оцінки параметрів передавальних функцій об'єкта керування завдяки застосуванню методів конфлюентного аналізу в умовах зашумленості вхідних і вихідних сигналів.

4. Вперше побудовано спрощену систему автономного керування каналами температури та вологості зерна, яка з необхідною точністю забезпечує процес сушіння, завдяки незміщеності та ефективності отриманих оцінок параметрів об'єкта та методів редукції складних передавальних функцій.

5. Вперше побудовано функціонально надійну адаптивну систему стабілізації оптимальних значень температури і вологості зерна в умовах неконтрольованих параметричних і сигнальних збурень завдяки ідентифікації і розв'язці каналів керування.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Завдяки оптимальній конструкції та досконалості системи керування створено умови для широкого використання подібних систем в малих фермерських

господарствах, що допоможе вирішити логістичну проблему транспортування зерна від виробника до споживача.

2. За рахунок впровадження адаптивної системи керування процесом зерносушіння отримано функціонально надійну систему стабілізації оптимальних значень температури і вологості зерна.

3. За рахунок використання сучасної цифрової техніки удосконалено систему керування.

4. Проведені експериментальні дослідження дають можливість за допомогою незначних капіталовкладень забезпечити роботу промислового сушильного агрегата з високими показниками якості. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження розробленої системи автоматичного керування процесом сушіння зернових культур складає 561,7 тис. грн.

5. Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи впроваджено у виробничий процес ТОВ “Шишацький комбікормовий завод”, що підтверджено відповідним актом реалізації від 23.01.2019р. Основні наукові та практичні результати впроваджені у навчальний процес на кафедрі автоматики і електроприводу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка в рамках викладання дисциплін «Теорія автоматичного керування», «Моделювання електромеханічних систем», «Основи автоматизованого проектування електротехнічних пристроїв та електромеханічних систем» та Полтавському коледжі харчових технологій Національного університету харчових технологій у викладанні лекційного матеріалу, практичних робіт, курсового проектування та виконання магістерських робіт (акти реалізації від 11.02.2019р. та від 25.02.2019р. відповідно).

Ключові слова: зерносушарка, сушильна камера, система з розподіленими параметрами, багатомірна модель, еталонна модель, адаптивна оптимальна система автоматичного керування, ідентифікація.

**НАУКОВІ ПРАЦІ, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ
РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ:**

1. Захарченко Р.В. Аналіз режимів сушки на основі математичної моделі /Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2015. – Випуск 3(35). – С. 83 – 84.

2. Захарченко Р.В. Моделювання процесу теплообміну через елементарний шар зерна /Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2016. – Випуск 2(38). – С. 38 – 40.

3. Захарченко Р.В. Аналіз багатовимірних систем за допомогою масиву відносних коефіцієнтів підсилення /Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2016. – Випуск 3(39). – С. 20 – 23.

4. Захарченко Р.В. Розв'язане керування багатовимірними системами /Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2016. – Випуск 4(40). – С. 18 – 20.

5. Захарченко Р.В. Дослідження інтегрованого методу ідентифікації /А.М. Сільвестров, Г.І. Кривобока, Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2017. – Випуск 2(42). – С. 55 – 56.

6. Zaharchenko R.V. Research integrated identification method / A.M. Silvestrov, G.I. Kryvoboka, R.V. Zaharchenko// Electronics and Control Systems. Kyiv. – 2017. – №1(51). – P. 88–90.

НАУКОВІ ПРАЦІ, ЯКІ ЗАСВІДЧУЮТЬ АПРОБАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ:

7. Захарченко Р.В. Методи зберігання зернових культур з автоматичним підтриманням необхідних параметрів / А.М. Сільвестров, О.В. Шульга, Р.В. Захарченко // Тези 66-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 15 квітня – 15 травня 2014 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2014. – Т. 1. – С. 45 – 47.

8. Захарченко Р.В. Дослідження засобів захисту зерна від шкідливих захворювань у елеваторах за допомогою автоматичного контролю кліматичних характеристик / А.М. Сільвестров, О.В. Шульга, Р.В. Захарченко // Тези 66-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 15 квітня – 15 травня 2014 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2014. – Т. 1. – С. 47 – 48.

9. Захарченко Р.В. Аналіз режимів сушки зерна на основі математичної моделі / Р.В. Захарченко // Тези 68-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 19 квітня – 13 травня 2016 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2016. – Т. 1. – С. 47 – 49.

10. Захарченко Р.В. Опис процесу теплообміну у шарі зерна / Р.В. Захарченко // Тези II Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика». (Полтава, 17 листопада 2016 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2016. – С. 44 – 46.

11. Захарченко Р.В. Керування багатовимірними системами за допомогою розв'язуючих мереж / О.В. Шульга, Р.В. Захарченко // Збірник наукових праць за матеріалами IX Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки». (Полтава, 7-9 грудня 2016 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2016. – С. 246 – 250.

12. Захарченко Р.В. Застосування розв'язуючих мереж при розв'язанні контурів багатовимірних систем / Р.В. Захарченко // Тези восьмої міжнародної

науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації». Державний університет телекомунікацій. – Київ, 11 – 12 квітня 2017 р. – С. 174.

13. Захарченко Р.В. Дослідження інтегрованого методу ідентифікації / Р.В. Захарченко // Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства». КрНУ ім. Михайла Остроградського. – Кременчук, 20-21 квітня 2017 р. – С. 90.

14. Захарченко Р.В. Моделювання інтегрованого методу ідентифікації в середовищі MATLAB / А.М. Сільвестров, Р.В. Захарченко // Тези 69-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 19 квітня – 19 травня 2017 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2017. – Т. 1. – С. 3 – 4.

15. Zaharchenko R.V. Research integrated identification method for the work of grain dryer / A.M. Silvestrov, G.I. Kryvoboka, R.V. Zaharchenko // The development of technical science: problems and solutions. Proceedings of the international research and practical conference. – The Czech Republic, Brno. – April 27 – 28, 2018. – pp. 105-108.

ANNOTATION

Zaharchenko R.V. Automated system for controlling the process of drying the grain. –The manuscript.

Dissertation for obtaining a scientific degree of a Candidate of Technical Sciences in specialty 05.13.07 «automation of control processes». – Central Ukrainian National Technical University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kropyvnytskyi, 2019.

The dissertation is devoted to a new approach to solving the problem of grain drying, which is to create an adaptive optimal system of automatic control of the drying process, which allows to obtain the conditioned grain for quality further storage.

In the first section an analysis of grain properties as an object of drying is carried out, experimental regularities of the grain drying process, modes and methods of drying are considered.

According to the results of the analysis in the first section, it was established that the heat resistance of the grain is characterized by the maximum temperature of heating, which ensures complete storage of all qualitative indicators of grain. The limit of the zero degree of denaturation of proteins is the basis for choosing the grain drying regime. Particular attention is paid to the maturity of the grain. Shells of freshly harvested grain, like the endosperm and the embryo, have not yet solidified and their water conductivity is lowered. In this regard, the heat resistance of such grain is reduced in comparison with the grain that has passed post-harvest maturation. To preserve the quality of the freshly harvested grain, it is dried using a reduced temperature of the drying agent at 20 ... 30 ° C and a grain temperature of 10 ° C.

Of the many methods of thermal drying, convection is the most common, in which heat energy is transmitted to the grain from the heated gas. The fact that the heated gas at the same time acts as a coolant and moisture collector, causes the relative simplicity of the designs of convection dryers.

The drying rate depends on the parameters of the drying agent (temperature, humidity and its velocity) and is determined by the conditions of external moisture diffusion in the environment.

The component of the drying process after heating the grain is its cooling. In direct-current driers, cooling is used at the final drying stage, which is due to the need to transfer the grain to equilibrium state not only in humidity, but also in temperature, with the aim of its long-term storage. The temperature of the grain coming out of the dryer may exceed the temperature of the outside air not more than 10 ° C.

The grain drying regime is a combination of certain parameters of the drying agent and the grain: temperature t_1 of the agent, initial humidity ω_0 and the maximum allowable temperature of the heating of the grain.

It is established that during drying of preheated grain, the surface gradient of moisture content is less than that of conventional convective drying, that is, the evaporation zone is located near the outer surface of the material to which the moisture moves in the form of a liquid. This prevents overheating of the surface of the material and promotes the storage and improvement of the quality of the grain.

As a result of the analysis of grain properties and drying processes, as a compromise on quality and cost, it is advisable to take as a basis for the creation of a new mini-dryer a mine direct-feed grain dryer.

In the second section it is established that drying of grain in a mine direct-feed grain dryer is described by a mathematical model with spatial distribution of parameters.

A study of a static dryer model is realized by solving static equations with allowance for boundary conditions. In this case, the solution of the static model as a smooth spatial coordinate function determines the smooth distribution of the defining parameter along spatial coordinates. This allows to limit the number of primary transducers to measure the temperature and humidity of the grain in the dryer shaft.

Proceeding from the physical foundations of the drying process and the structure of the mathematical model of a dryer with three-dimensional distribution in the parameter space in the Cartesian coordinate system with boundary conditions of the third kind and the smoothness of the spatial temperature distribution (and humidity respectively) of the grain mass, in order to simplify the construction of the system of automatic process control, it is expedient to move from a system with distributed to a system with lumped parameters, introducing it to the matrix transmitted communication function and-x inputs with j-th output variables, which are measured in corresponding points of the unit with a limited number of primary temperature and humidity converters.

In the third section, the structure and algorithm of functioning of a multidimensional autonomous ACS with a reference model, which fulfills the task of drying the grain with the necessary quality, is developed.

The analysis of the simulation schedules showed that the developed control system satisfies the quality indicators at the determined parameters of the control object. However, during the drying process, the grain parameters change. This leads to the fact that the system can not manage the drying process qualitatively (there is overregulation, the time of the transient process increases) or it becomes unmanageable at all. Therefore, in order to solve this problem, it is necessary to monitor the change of the parameters of the control object. This task is solved by building a subsystem of identification. The complement of the system of autonomous optimal (in the sense of conformity with the

standard) control of the dryer as a multidimensional object, the subsystem of identification of the parameters of direct and cross-links in the control object, allows us to create a functionally reliable ACS in conditions of unsteadiness and stochastic characteristics of the object.

In the fourth section, using the system approach and the structure and algorithms of the operation of the multiple-adaptive identification system, a subsystem of process identification in the dryer was built.

Taking into account the standard situation for the use of the least squares method for the real situation of noise in both the output and the input variables of the identification object, the method of minimizing the optimally weighed amount was tested and used more perfectly (in the sense of unboundness and efficiency of the parameter estimates) symmetric correlation functions.

As a result of the use of the ILSM, unmatched and effective estimates of the transfer functions of the dryer have been obtained, which allowed to implement optimal adaptive algorithms for autonomous control of separate channels of humidity temperature of the dryer as a multidimensional object with cross-links.

The expected annual economic effect from the implementation of the developed automatic control system of the grain drying process is 561.7 thousand UAH. The payback period for the production of a grain dryer is 5 months.

The scientific novelty of the results is as follows:

1. The mathematical model of the drying process with distributed and concentrated parameters, relative to the measuring system, has been further developed.
2. For the first time, an autonomous adaptive control system for the drying of cereals is developed, which provides optimal modes in the conditions of uncertainty and non-stationarity of the parameters of the object and environment.
3. For the first time, unbiased and effective estimates of the parameters of the control functions of the control object have been obtained due to the application of methods of confluence analysis in the conditions of noise of input and output signals.
4. For the first time, a simplified system of autonomous control of temperature and humidity channels of grain, which with the necessary precision ensures the drying

process, due to the unbiased and efficient obtained estimates of the object parameters and methods of reduction of complex transfer functions.

5. For the first time a functionally reliable adaptive system of stabilization of optimal values of temperature and humidity of grain in conditions of uncontrolled parametric and signal perturbations thanks to the identification and decoupling of control channels was built.

The practical value of the results:

1. Due to the optimum design and perfection of the management system, the conditions for widespread use of such systems in small farms have been created, which will help to solve the logistical problem of transporting grain from producer to consumer.

2. Due to the introduction of an adaptive control system of the grain drying process, a functionally reliable system of stabilization of optimal values of temperature and humidity of the grain was obtained.

3. The use of modern digital technology has improved the control system.

4. The experimental studies carried out make it possible, with a small investment, to ensure the operation of an industrial drying unit with high quality indicators. The expected annual economic effect from the implementation of the developed automatic control system of the grain drying process is 561.7 thousand UAH.

5. Theoretical and practical results of the dissertation work were introduced into the production process of LLC "Shishatsky Combined Feed Factory", which was confirmed by the relevant act of realization from 23.01.2019. The main scientific and practical results were introduced into the educational process at the department of automation and electric drive of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University within the teaching of the disciplines "Theory of automatic control", "Modeling of electromechanical systems", "Fundamentals of automated design of electrotechnical systems and electromechanical systems" and in the teaching of lecture material, practical works, chickens ow design and execution of master's works in Poltava College of Food Technologies of National University of Food Technologies (acts of realization from 11.02.2019 and from 25.02.2019 respectively).

Key words: grain dryer, drying chamber, distributed parameter system, multidimensional model, reference model, adaptive optimal automatic control system, identification.

ЗМІСТ

ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1	
ТЕОРЕТИКО–ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗЕРНА ЯК	
ОБ'ЄКТА СУШІННЯ	
1.1. Аналіз властивостей зерна як об'єкта сушіння.....	24
1.2 Повітря та його суміш з топковими газами як агенти сушіння.....	34
1.3 Експериментальні закономірності процесу сушіння зерна.....	37
1.4 Огляд методів сушіння зерна.....	39
1.5 Характеристика станів зернового шару.....	42
1.6 Режими сушіння зерна.....	46
1.7 Шляхи вдосконалення технології сушіння зерна.....	49
Висновки за розділом.....	51
РОЗДІЛ 2	
ПОДАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ МОДЕЛЛЮ З ПРОСТОРОВИМ	
РОЗПОДІЛЕННЯМ ПАРАМЕТРІВ	
2.1 Математичне моделювання сушарки як об'єкта з розподіленими параметрами.....	54
2.1.1 Загальна характеристика об'єктів з просторовим розподіленням параметрів.....	54
2.1.2 Просторові системи координат та їх застосування для моделювання процесів у сушарці.....	56
2.1.3 Математична модель теплових процесів у сушарці з врахуванням граничних умов.....	59
2.2 Статичні теплові режими в зерносушарці.....	60
2.3 Отримання передаточних функцій процесів в зерносушарці.....	64
2.4 Дискретне подання рівнянь (2.45) динаміки процесів в сушарці.....	69
2.5 Моделювання процесу теплообміну через елементарний шар зерна.....	73

Висновки за розділом.....	79
РОЗДІЛ 3	
РОЗРОБКА АДАПТИВНОЇ ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	
АВТОНОМНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СУШКИ ЗЕРНА.....	
80	80
3.1 Аналіз існуючих зерносушаркок як об'єкта керування.....	80
3.1.1 Шахтні прямоточні зерносушарки.....	81
3.1.2 Зерносушарки типу ДСП.....	86
3.2 Розробка конструкції дослідного зразка мінісушарки.....	87
3.3 Теоретико–експериментальний підхід до побудови моделі САК	
зерносушаркою.....	91
3.3.1 Математичні моделі багатомірних САК.....	91
3.3.2 Розробка математичної моделі автономної оптимальної САК	
процесами в мінісушарці.....	100
3.3.2.1 Синтез діагоналізатора виконавчого механізму.....	100
3.3.2.2 Синтез компенсатора–діагоналізатора сушильної камери.....	107
3.3.2.3 Синтез оптимальних регуляторів.....	109
3.4 Дослідження робастності системи до неточності математичної моделі	
об'єкта сушіння.....	114
Висновки за розділом.....	123
РОЗДІЛ 4	
СТВОРЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ НА ОСНОВІ СИСТЕМНОГО	
ПІДХОДУ ПІДСИСТЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСІВ В	
СУШАРЦІ.....	
124	124
4.1 Використання основ системного підходу як ефективного інструменту	
побудови підсистеми ідентифікації.....	124
4.2 Класифікація систем ідентифікації за ступенем їх досконалості.....	127
4.3 Декомпозиція багаторівневої адаптивної системи управління	
сушильним агрегатом (СА).....	130

4.4 Принцип узгодженості показників якості підсистем багаторівневої системи управління СА.....	133
4.5 Композиція підсистем багаторівневої системи СА.....	138
4.6 Ідентифікація динаміки процесу сушіння зерна в секції мінізерносушарки.....	142
4.6.1 Загальні положення.....	142
4.6.2 Ефект зміщення і регуляризація МНК – оцінок в реальних умовах.....	144
4.6.3. Метод незміщеного і ефективного оцінювання, який пропонується використовувати в реальних умовах.....	145
4.6.4 Співставлення роботи МНК і запропонованого методу в умовах наближених до реальних.....	147
4.7 Визначення передаточних функцій “вхід–вихід” експериментальної установки для сушіння зерна.....	153
Висновки за розділом.....	158
ВИСНОВКИ	159
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	161
ДОДАТКИ	174

ВСТУП

Актуальність роботи. Аграрний сектор економіки, важливою складовою якого є сільське фермерське господарство, формує продовольчу, а у визначених межах і економічну, екологічну та енергетичну безпеку. Він забезпечує розвиток технологічно пов'язаних галузей національної економіки та створення соціально-економічних умов для розвитку. Агропромисловий комплекс складає близько 12% валової доданої вартості України, є одним з основних бюджетоформуючих секторів національної економіки. За період з 2007 по 2018 рік виробництво продукції в сільськогосподарських підприємствах зросло майже у два рази. При цьому половина валової продукції виробляється в особистих селянських господарствах, де гостро постає проблема обробки і зберігання врожаю. Оскільки сире зерно не може зберігатися довгий час, його потрібно просушити. Однак, малі селянські господарства не мають необхідних технічних засобів для цього. Тому актуальною є розробка недорогих малопотужних зерносушарок з автоматизованим і оптимізованим процесом сушіння зерна.

Внаслідок незавершеності процесів адаптації до європейських вимог щодо якості та безпечності харчових продуктів, нестійкості торговельних відносин з державами-імпортерами, конкурентні позиції вітчизняної сільськогосподарської продукції на зовнішньому ринку не є стабільними. Тому в межах малих фермерських господарств важливо розвивати власні засоби збереження і переробки сировини та виготовлення вторинної продукції. Це вимагає модернізації технічної бази, автоматизації і оптимізації технологічних процесів сушіння зерна.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконано в рамках держбюджетної теми “Науково-дослідницька робота 2908-П номер державної реєстрації 1116U003716 “Методи та засоби структурно-параметричної ідентифікації електротехнічних систем” та відповідно до напрямку

наукової діяльності кафедри автоматики і електроприводу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка “Автоматизація технологічних процесів на базі ідентифікації нечітких регуляторів і розпізнавання образів”.

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності процесу обробки і збереження зернових культур шляхом розроблення оптимальної адаптивної системи керування процесом сушіння зернових культур з ідентифікатором і еталонною моделлю.

Об’єктом дослідження є процес керування гранично допустимою температурою та необхідною вологістю зерна в процесі його сушіння.

Предметом дослідження є адаптивні автономні системи керування процесом сушіння зерна з оптимальним ідентифікатором та еталонною моделлю.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно розв’язати наступні задачі:

1. Провести аналіз властивостей зерна як об’єкта сушіння та методів і режимів процесу сушіння.
2. Провести дослідження математичної моделі процесів зерносушарки, як об’єкта з розподіленими параметрами та перейти до еквівалентної системи з зосередженими параметрами.
3. Розробити структуру і алгоритм функціонування багатомірної автономної САК з еталонною моделлю та ідентифікатором, котра з необхідною якістю відпрацьовує завдання процесу сушіння зерна.
4. Розробити підсистему ідентифікації для відслідковування зміни параметрів сушарки, як об’єкта керування, що дозволить створити функціонально надійну САК в умовах нестаціонарності і стохастичності характеристик об’єкта керування та внутрішнього і зовнішнього середовища.
5. Отримати незміщені і ефективні оцінки параметрів передаточних функцій окремих каналів сушарки з метою реалізації оптимального адаптивного алгоритму автономного керування окремими каналами температури і вологості сушарки як багатомірного об’єкта з перехресними зв’язками.

Методи дослідження. В якості теоретичної бази, у процесі досліджень, використано класичні і сучасні методи теорії автоматичного керування, математичний аналіз, теорію систем із зосередженими і розподіленими параметрами, методи комп'ютерного моделювання складних багатомірних динамічних систем. Як експериментальну базу використано теорію планування і оптимальної обробки даних натурального експерименту, сучасну теорію ідентифікації та математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Набула подальшого розвитку математична модель процесу сушіння з розподіленими і зосередженими, відносно вимірювальної системи, параметрами.
2. Вперше розроблено автономну адаптивну систему керування процесом сушіння зернових культур, яка забезпечує оптимальні режими в умовах невизначеності та нестационарності параметрів об'єкта і середовища.
3. Вперше отримано незміщені та ефективні оцінки параметрів передавальних функцій об'єкта керування завдяки застосуванню методів конфлюентного аналізу в умовах зашумленості вхідних і вихідних сигналів.
4. Вперше побудовано спрощену систему автономного керування каналами температури та вологості зерна, яка з необхідною точністю забезпечує процес сушіння, завдяки незміщеності та ефективності отриманих оцінок параметрів об'єкта та методів редукції складних передавальних функцій.
5. Вперше побудовано функціонально надійну адаптивну систему стабілізації оптимальних значень температури і вологості зерна в умовах неконтрольованих параметричних і сигнальних збурень завдяки ідентифікації і розв'язці каналів керування.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

1. Завдяки оптимальній конструкції та досконалості системи керування створено умови для широкого використання подібних систем в малих фермерських господарствах, що допоможе вирішити логістичну проблему транспортування зерна від виробника до споживача.

2. За рахунок впровадження адаптивної системи керування процесом зерносушіння отримано функціонально надійну систему стабілізації оптимальних значень температури і вологості зерна.

3. За рахунок використання сучасної цифрової техніки удосконалено систему керування.

4. Проведені експериментальні дослідження дають можливість за допомогою незначних капіталовкладень забезпечити роботу промислового сушильного агрегата з високими показниками якості. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження розробленої системи автоматичного керування процесом сушіння зернових культур складає 561,7 тис. грн.

5. Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи впроваджено у виробничий процес ТОВ “Шишацький комбикормовий завод”, що підтверджено відповідним актом реалізації від 23.01.2019р. Основні наукові та практичні результати впроваджені у навчальний процес на кафедрі автоматики і електроприводу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка в рамках викладання дисциплін «Теорія автоматичного керування», «Моделювання електромеханічних систем», «Основи автоматизованого проектування електротехнічних пристроїв та електромеханічних систем» та Полтавському коледжі харчових технологій Національного університету харчових технологій у викладанні лекційного матеріалу, практичних робіт, курсового проектування та виконання магістерських робіт (акти реалізації від 11.02.2019р. та від 25.02.2019р. відповідно).

Особистий внесок здобувача в одержанні наукових результатів. Основні теоретичні, практичні та експериментальні результати досліджень, що містяться у дисертаційній роботі, отримані автором особисто та опубліковані з необхідною повнотою.

Із опублікованих у співавторстві наукових роботах для дисертаційної роботи взяті саме ті ідеї та положення, котрі особисто розроблені здобувачем.

У роботах зі співавторством автору безпосередньо належить наступне: в реальних умовах зашумленості вхідних і вихідних сигналів отримано незміщені та

ефективні оцінки параметрів передавальних функцій об'єкта керування завдяки застосуванню інтегрованого методу найменших квадратів [5, 6].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційних досліджень, практичні висновки та рекомендації, одержані в процесі досліджень, були апробовані, оприлюднені та отримали позитивну оцінку у ході науково-практичних конференцій, зокрема, міжнародних: IX Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки» (7-9 грудня 2016 р., м. Полтава); VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації» (11-12 квітня 2017 р., м. Київ); XXIV Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» (20-21 квітня 2017 р., м. Кременчук); Міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток технічних наук: проблеми та рішення» (27-28 квітня 2018 р., м. Брно, Чеська Республіка); всеукраїнських: II Всеукраїнській науково-практичній Інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика» (17 листопада 2016 р., м. Полтава); 66 науковій конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів ПолтНТУ (15 квітня – 15 травня 2014 р., м. Полтава); 68 науковій конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів ПолтНТУ (19 квітня – 13 травня 2016 р., м. Полтава); 69 науковій конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів ПолтНТУ (19 квітня – 19 травня 2017 р., м. Полтава).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 6 статей у наукових фахових виданнях та збірниках наукових праць, що входять до переліку рекомендованих МОН України [1-6], (4 з них одноосібні) у тому числі 5 статей – міжнародні публікації або у збірниках, що входять до міжнародних наукометричних баз даних [2-6].

Опубліковано 9 доповідей на наукових, науково-практичних і науково-технічних конференціях (семінарах) різного рівня, з яких 4 на міжнародних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається з анотацій, вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного з них, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Основна частина дисертації складає 145 сторінок. Робота містить 57 рисунків, 6 таблиць, список використаних джерел, що налічує 134 найменування та 4 додатків.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИКО–ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗЕРНА ЯК ОБ'ЄКТА СУШІННЯ

1.1. Аналіз властивостей зерна як об'єкта сушіння

Зернина є анізотропним колоїдним капілярно–пористим тілом із складною будовою. Вона має оболонки з кількох шарів, ендосперм – основна, зародок – головна частина. Насіння зернових культур складається із білків, вуглеводів, жирів, мінеральних речовин, вітамінів і ферментів. Оболонки зернини містять вуглеводи у вигляді клітковини та супутніх їй речовин (пентозанів, золи); в алейроновому шарі є багато білків і жиру. Ендосперм містить основну кількість вуглеводів у вигляді крохмалю та запасних білків, але в ньому мало золи й клітковини. У зародку є багато білків і вуглеводів у вигляді глюкози і жирів [1, 2].

Волога у зерні є на поверхні, у капілярах, усередині клітин зерна. Вона має важливе значення для життєдіяльності зерна, але її надлишок призводить до інтенсифікації життєвих процесів, самозігрівання та погіршення якості зерна.

Залежно від вмісту вологи зерно поділяють на *сухе* (до 14 %), *середньої сухості* (від 14 до 16 %), *вологе* (від 16 до 18 %), *сире* (понад 18 %). У зерновій масі волога розподіляється нерівномірно. При середній вологості зерна 22 % близько 10 % мають вологість нижче 17 %, а понад 20 % – вище 25 %. У зернині волога розподіляється також нерівномірно: найбільше її є в зародку, менше – в ендоспермі, а ще менше – в оболонках. При середній вологості зерна 17 % зародок має вологість 19,4 %, ендосперм – 16,7 % [2, 3, 7, 8].

Маса зерна G складається з мас сухої речовини G_c і вологи G_v .

У теорії та практиці сушіння застосовують три поняття:

1) вологість на загальну масу:

$$\omega^s = \frac{G_{\dot{a}}}{G} \cdot 100\% = \frac{G_{\dot{a}}}{G_c + G_{\dot{a}}} \cdot 100\%; \quad (1.1)$$

2) вологість на суху речовину ω^c (%)

$$\omega^{\dot{n}} = \frac{G_{\dot{a}}}{G_{\dot{n}}} \cdot 100\% = \frac{G_{\dot{a}}}{G - G_{\dot{a}}} \cdot 100\% ; \quad (1.2)$$

3) якщо (1.2) виразити в кілограмах вологи на кілограм сухої речовини, то дістанемо вологовміст u (кг вол./кг сух. реч.):

$$u = \frac{G_{\dot{a}}}{G_c} = \frac{\omega^c}{100} . \quad (1.3)$$

Співвідношення між вологістю на загальну масу ω^3 та на суху речовину ω^c знайдемо, якщо (1.1) поділимо на добуток $G_c \cdot 100$, а (1.2) – на добуток $G \cdot 100$. Тоді з урахуванням рівнянь (1.1) і (1.2) матимемо (%):

$$\omega^3 = \frac{100\omega^c}{100 + \omega^c} \quad (1.4)$$

$$\omega^c = \frac{100\omega^3}{100 - \omega^3} \quad (1.5)$$

У подальшому ω^3 називатимемо просто вологістю ω . Волога в зерні має різний зв'язок зі скелетом: від найміцнішого, зумовленого молекулярними силами, до суто механічного утримання вологи на поверхні зерна. На основі енергії зв'язку запропоновано [1, 2, 4, 12] класифікацію видів зв'язку вологи в колоїдних капілярно–пористих тілах. Для визначення енергії зв'язку вологи із зерном використовують значення роботи ізотермічного оборотного відривання одного моля води для даного вологовмісту без зміни складу речовини:

$$E = RT \frac{p_n}{p_m} = -RT \ln \varphi \quad (1.6)$$

де E – енергія зв'язку вологи, Дж/моль; R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К); T – температура, К; p_n – тиск насиченої пари вільної води над плоскою поверхнею, Па; p_m – парціальний тиск пари на поверхні зерна з вологовмістом u , Па; φ –

відносна вологість повітря. При зниженні вологості зерна значення E зростає з переходом від одного типу зв'язку вологи до іншого [2, 8].

Види зв'язку вологи в тілах поділяють [2] на три групи:

- 1) *хімічний*:
 - a) іонний – порушується внаслідок руйнування речовини через хімічну взаємодію, іноді – прожарювання;
 - b) молекулярний – руйнується внаслідок прожарювання.
- 2) *фізико-хімічний*:
 - a) адсорбційний – вода може бути видалена під час сушіння зерна завдяки додатковим витратам енергії на руйнування зв'язку вологи із зерном;
 - b) осмотичний – також необхідна додаткова витрата енергії;
 - c) структурний – енергія витрачається на подолання опору структурних утворень зерна внаслідок дифузії вологи у вигляді як пари, так і рідини до його поверхні.
- 3) *механічний*:
 - a) волога мікрокапілярів – міцність зв'язку вологи, що заповнює мікрота макрокапіляри, значно менша від міцності зв'язаної вологи, але й при її видаленні у процесі сушіння зерна потрібна деяка додаткова енергія;
 - b) волога макрокапілярів;
 - c) зв'язок змочування – найменше міцний, волога може просочуватися всередину зерна внаслідок осмотичного тиску, утворюючи новий вид зв'язку – осмотичний або структурний. При цьому зерно набухає (збільшується в об'ємі).

Оцінюючи форму та розміри зернини користуються товщиною a , шириною b та довжиною l зернини. Знаючи їх, можна визначити площу поверхні S_3 та об'єм V_3 зернини:

$$S_3 = 4\pi R(l + 3R); \quad (1.7)$$

$$V_3 = K_3 abl, \quad (1.8)$$

де

$$R = \frac{5a+6b}{60}, \quad (1.9)$$

K_3 – коефіцієнт форми зернини (для пшениці $K_3 = 0,52$; жита $K_3 = 0,42$).

Для розрахунку процесів перенесення теплоти та вологи в сушарці користуються значенням питомої поверхні зернин: S_z / V_z . Відношення об'єму міжзернового простору до всього об'єму називається *шпаруватістю* [2, 19]. Чим більші зернини, тим більша шпаруватість зернової маси. Щільність укладання зернин характеризується *насіпною щільністю*. На підприємствах користуються *натурою зерна* (маса 1 л зерна) [2, 19].

Сипучість зернової маси визначається *кутом природного укосу*, який залежить від вологості зерна (табл. 1.1). Сипучість враховують під час вибору розмірів, форми, кутів нахилу різних вузлів зерносушарок.

Таблиця 1.1

Вологість і кут природного укосу зернової маси

Показник	Пшениця		Жито		Кукурудза		Ячмінь		Соняшник	
Вологість, %	15	35	11	18	15	25	12	18	7	25
Кут природного укосу, град	30	38	23	34	30	40	28	32	31	42

Самосортування зернової маси спостерігається в період її переміщення і виражається в розшаруванні компонентів зерна, що мають різну густину, на окремих ділянках насипу.

Гідравлічний опір зернового шару залежить від товщини шару, що продувається, швидкості та параметрів повітря, шпаруватості зернової маси, стану (шорсткості) поверхні зернин. Якщо через зерновий шар, який лежить на решітці, пропускати знизу потік повітря і збільшувати його швидкість v , то зерновий шар починає розпушуватися (ділянка *AB*, Рис. 1.1). Спад тим більший, чим більші вологість зерна та щільність його укладання. При швидкості $v_{кр}$ спад тиску в шарі досягає максимального значення $\Delta p_{кр}$.

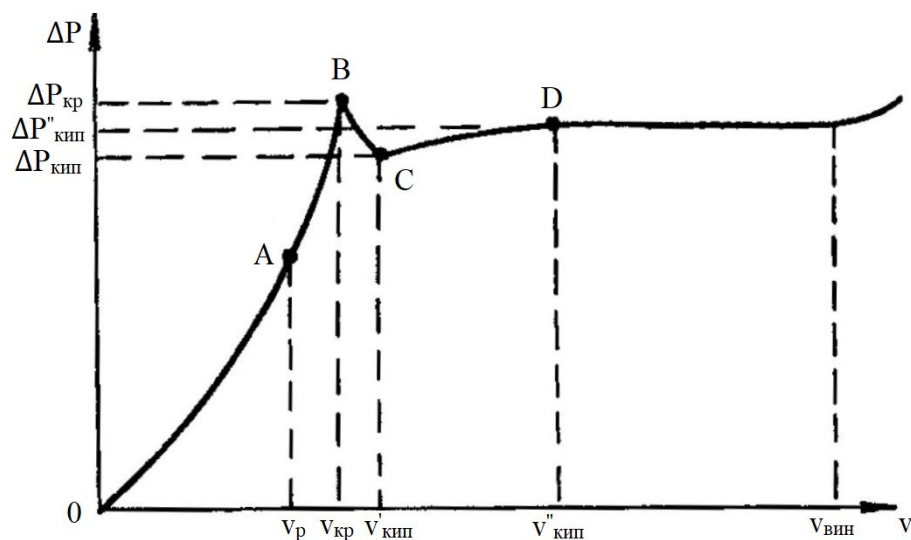


Рис. 1.1. Діаграма стану зернового шару залежно від швидкості потоку повітря

Збільшення швидкості повітря за $v_{кр}$ приводить до початку псевдорозрідження шару та зниження спаду тиску (ділянка BC). На цій ділянці спостерігаються місцеві прориви повітря та нестійке «кипіння» шару, тому ділянку BC називаються *перехідною стадією псевдорозрідження*. Точку C , що відповідає мінімальному спаду тиску $\Delta p'_{кип}$ і відповідну їй швидкість $v'_{кип}$ приймають за початок першої стадії псевдорозрідження. На ділянці CD спад тиску в шарі збільшується до значення $\Delta p''_{кип}$. При цьому рухомість зерна у шарі та рівномірність його «кипіння» підвищуються. Швидкість повітря $v''_{кип}$ (точка D) приймають за початок другої стадії псевдорозрідження. У ній при підвищенні швидкості повітря спад тиску в зерновому шарі не змінюється. Спостерігається стійке «кипіння» шару. За швидкості повітря $v_{вин}$ зернини виносяться з шару. Під час стійкого кипіння спад тиску в шарі $\Delta p''_{кип}$ дорівнює масі зернин, що припадають на одиницю площі решітки. Проектуючи зерносушарки із псевдорозрідженим шаром, як робочу швидкість повітря, що забезпечує стійке й рівномірне кипіння зернового шару, вибирають швидкість $2v_{кр}$ [2, 24, 32]. Коефіцієнт 2 називають *числом псевдорозрідження*. Для зернових культур $v_{кр}$ лежить у межах $0,9 \dots 1,1$ м/с.

Зернини всіх культур поглинають пару води з навколишнього середовища. Кількість вологи, що поглинається, залежить від температури t та відносної вологості φ зовнішнього повітря, від зернової культури та її вологості ω . Зі

зниженням температури t і підвищенням вологості φ кількість води, що поглинається, збільшується і навпаки. Різні зернові культури поглинають неоднакову кількість води [2, 8, 24].

Властивість зерна поглинати пару води з повітря називається *сорбційною здатністю*, а процес зволоження – *сорбцією води*. Кожному стану середовища для даної зернової культури відповідає певний стан вологості, який називають *рівноважною вологістю* ω_p . Сорбційна здатність зерна змінюється в широких межах [2, 8, 24].

Функція ω_p^c (рис. 1.2) має дві точки перегину, для $\varphi > 80\%$ значення ω_p^c різко зростає і для $\varphi = 100\%$ досягає максимуму, за якого вологість називають *гігроскопічною вологістю* ω_g .

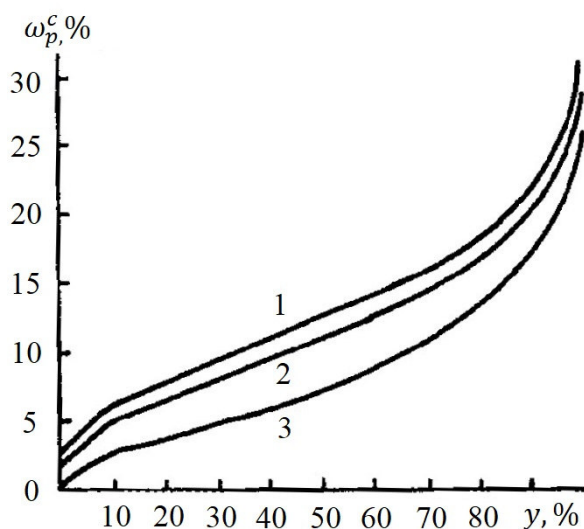


Рис. 1.2. Залежність рівноважної вологості зерна на суху речовину від відносної вологості повітря для різних температур: 1 – 20 °C; 2 – 40 °C; 3 – 60 °C

Гігроскопічна точка на кривій сорбції є граничним значенням ω_p^c для зволоження зерна паром води. Подальше зволоження можливе тільки в разі безпосереднього контакту води в рідкій фазі з поверхнею зернової маси. Гігроскопічна вологість ω_g при $t = 25\text{ °C}$ становить: 36,3...38,5% – пшениця; 36,5 % – овес; 36,5 % – жито; 32,5 % – гречка. Окремі частини зернини мають різну гігроскопічність. Найбільша гігроскопічність у зародка, найменша – в оболонки та ендосперму [2, 7, 8].

Ізотерма десорбції 1 зерна в координатах $\omega_p - \varphi$ лежить вище від ізотерми сорбції 2 (рис. 1.3). Найбільша розбіжність між ними – на ділянці з відносною вологістю повітря φ від 20 до 80 %. Різниця в рівноважній вологості по ізотермах сорбції та десорбції на цій ділянці досягає 1,2...4 %. Явище незбігу кривих сорбції та десорбції називають *сорбційним гістерезисом*. Гігротермічна рівновага колоїдних тіл з навколишнім середовищем настає надзвичайно повільно. Тому значення ω_p , визначене під час сорбції, буде меншим від справжнього, а під час десорбції – більшим. Для побудови кривих сорбції та десорбції зерна користуються двома способами.

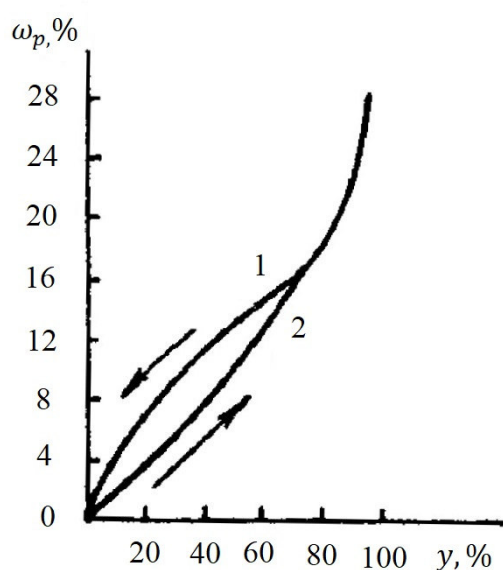


Рис. 1.3. Ізотерми сорбції та десорбції зернових культур

Статичний спосіб найпростіший. Зразок зерна поміщають в ексікатор із середовищем, що має певну насиченість φ парою води і витримують у термостаті при незмінних параметрах t та φ протягом тривалого періоду (до кількох тижнів і більше). Недолік статичного способу – тривалість і пов'язані з цим труднощі здобуття даних в області підвищених значень відносної вологості повітря ($\varphi > 90\%$) через псування зерна.

Динамічний спосіб більш надійний та швидкий. Зразок зерна розміщують у посудині, через яку прокачують повітря з певними значеннями температури t та вологості φ . Як і при статичному способі, зразок зерна періодично зважують до

досягнення ним сталої маси. Процес може бути ще більш прискорений шляхом апроксимації маси m зразка у часі експонентою:

$$m(t) = (m(\infty) - m(0)) \cdot \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right] + m(0) \quad (1.10)$$

Для виконання розрахунків, які стосуються процесів нагрівання, сушіння та охолодження зерна, використовують його теплофізичні характеристики, які залежать від вологості, температури та виду зернової культури. Характер перебігу теплових процесів визначається теплопровідністю λ та об'ємною теплоємністю ρC , де ρ – густина, а C – питома теплоємність. Сукупний вплив їх враховується температуропровідністю зерна $a = \lambda / (\rho C)$ [4]. Питома теплоємність зернин і зернового шару практично однакова, оскільки маса повітря у міжзерновому просторі шару дуже мала порівняно з масою зерна. Вона (1.11) є функцією вологості та температури. За вологості зерна 25 % вона не залежить від температури, але за меншої вологості з підвищенням температури теплоємність збільшується, а за більшої вологості, навпаки, зменшується (табл. 1.2).

$$C = \frac{\omega}{100} C_B + \frac{100-\omega}{100} C_C \quad (1.11)$$

де ω – вологість зерна, %; C_B – питома теплоємність води [$C_B = 4,19$ кДж/(кг·К)]; C_C – питома теплоємність сухої речовини [$C_C = 1,55$ кДж/(кг·К)].

Таблиця 1.2

Питома теплоємність C [Дж/(кг·К)] пшениці

Вологість – зерна, %	Температура зерна, °С						
	0	10	20	30	40	50	60
10	1428	1498	1568	1638	1707	1777	1847
15	1747	1801	1855	1910	1964	2018	2073
20	2031	2062	2092	2122	2152	2184	2215
25	2292	2292	2292	2292	2292	2292	2292
30	2533	2498	2464	2430	2396	2362	2328

Внаслідок низької теплопровідності теплота в зерновій масі затримується у шарі, що контактує з гарячими поверхнями сушарки. Зерно в цьому шарі може перегрітися, а якість його погіршиться. До заходів, що попереджають перегрівання зерна, включають: покриття гарячих поверхонь сушарки тепловою ізоляцією; виготовлення їх із матеріалів з низькою теплопровідністю; усунення прямого

контакту зерна в небезпечній зоні з гарячими газами; здійснення раціонального режиму роботи випускного механізму та ін. [1, 5, 6]. Теплопровідність зернин у два–три рази вища, ніж зернового шару.

Температуропровідність характеризує здатність зерна пропускати температурну хвилю, а обернена їй величина – температурну інерцію зерна. Чим вище значення температуропровідності, тим більша швидкість поширення температурної хвилі (ізотерми) і менша різниця температур між різними точками зернової маси. Зернова маса характеризується низьким значенням температуропровідності (у 1000 разів нижча, ніж у алюмінію). Температурна хвиля поширюється в ній занадто повільно (на 20 мм за 150 с). У зерновому шарі з підвищенням вологості температуропровідність неперервно знижується.

Коефіцієнт теплосасвоєння ε (теплової активності)

$$\varepsilon = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (1.12)$$

характеризує відведення теплоти з поверхні в середину зерна (або підведення теплоти із середини до його поверхні). Густина теплового потоку на поверхні та кількість теплоти, що пройшла крізь поверхню зерна, пропорційні коефіцієнту теплосасвоєння. Його треба враховувати для розроблення та експлуатації систем дистанційного і місцевого контролю температури зерна та газів у зерносушарці. Внаслідок низьких значень коефіцієнта теплосасвоєння зернового шару (у 30 разів нижчі, ніж у сталі) й, особливо, повітря (у 70...80 разів нижчі порівняно із зерновим шаром) прогрівання масивних вимірювальних перетворювачів температури відбувається повільно, що призводить до запізнювання їх показів [2, 7].

Здатність зерна зберігати під час сушіння насінневі, продовольчі та інші властивості називається *термостійкістю* [2, 3]. У процесі сушіння зерно може втратити свою життєдіяльність, знизити товарно–продовольчі якості. Термостійкість зерна характеризується максимальною температурою нагрівання θ_{max} , за якої забезпечуватиметься повне зберігання всіх якісних показників зерна. Межа нульового ступеня денатурації білків може бути покладена в основу вибору режиму сушіння зерна. Особливу увагу слід приділяти зрілості зерна. Оболонки свіжозібраного зерна, як ендосперм і зародок, ще недостатньо затверділи і

вологопровідна здатність їх знижена. У зв'язку з цим термостійкість такого зерна знижується порівняно із зерном, що пройшло післязбиральне дозрівання. Щоб зберегти якість свіжозібраного зерна, його сушать, використовуючи знижені температуру агента сушіння (на 20...30°C) та температуру зерна (на 10°C) [2, 3].

Якщо зернину та вологу, що в ній знаходиться, розглядати як термодинамічну систему, то можна використати відомі термодинамічні параметри, до яких належать потенціал перенесення вологи та питома вологомісткість. У стані термодинамічної рівноваги окремої зернини або системи «зернина – навколишнє середовище чи агент сушіння» потенціали в різних її зонах однакові і перенесення вологи немає. Обов'язковою умовою перенесення вологи є поява градієнтів потенціалу перенесення:

$$\vec{g}_m = -\lambda_m \nabla \theta_m, \quad (1.13)$$

де \vec{g}_m – густина потоку вологи, кг/(м²·год); λ_m – коефіцієнт вологопровідності, кг/(м·год·од. потенціалу); $\nabla \theta_m$ – градієнт потенціалу перенесення вологи, од. потенціалу/м, пропорційний градієнту тиску пари (градієнту капілярного потенціалу, або градієнту осмотичного тиску). За ізотермічних умов потенціал перенесення вологи лінійно залежить від вологовмісту V :

$$\theta_m = V / \bar{C}_m, \quad (1.14)$$

де \bar{C}_m – середня питома вологомісткість зерна, кг вологи/(кг сухої речовини · од. потенціалу), яка визначається кількістю вологи, яку необхідно додати за даної температури одиниці маси абсолютно сухої речовини зерна, щоб підвищити на одиницю його потенціал вологоперенесення.

Залежність між градієнтом потенціалу перенесення вологи та градієнтом вологовмісту ∇U :

$$\nabla \theta_m = \frac{1}{C_m} \nabla U, \quad (1.15)$$

де U – вологовміст зерна, кг/кг.

З урахуванням (1.15) рівняння (1.13) набуває вигляду

$$\vec{g}_m = \frac{\lambda_m}{C_m} \nabla U, \quad (1.16)$$

який слід враховувати при проектуванні сушарки.

1.2 Повітря та його суміш з топковими газами як агенти сушіння

Процес сушіння зерна полягає у видаленні з нього зайвої вологи із застосуванням способів, що ґрунтуються на використанні теплоти. Пронизуючи шар зерна, нагріте повітря або його суміш з топковими газами передають теплоту до зерна і виносять з собою утворену водяну пару. На практиці доводиться мати справу не з сухим атмосферним повітрям, а з *вологим повітрям*. Суміш повітря з топковими газами, яку застосовують у сушарках, є сумішшю вологого повітря та продуктів згоряння палива. У межах температур і тиску, що допускаються під час сушіння зерна до нагрітого повітря або до його суміші з топковими газами, можна (з достатньою точністю) застосувати закони фізики ідеальних газів. Характеризують стан повітря або його суміші з топковими газами загальний і парціальний тиски пари та сухого газу, вологість, вологовміст, густина, питомий об'єм, температура та ентальпія. Щоб працювала сушарка, недостатньо випарити вологу із зерна, треба ще й видалити її із сушильної камери. Для цього під час теплового сушіння зерна використовують агент сушіння, а під час сорбційного – всілякі сорбуючі матеріали, наприклад сухе зерно тієї самої культури. Агент сушіння – це робоче тіло, яке здійснює термодинамічну роботу, витрачаючи свою енергію на випаровування вологи із зерна. Як агент сушіння застосовують вологе повітря або його суміш з газоподібними продуктами згоряння палива [10, 11]. Із методів теплового сушіння найпоширенішим є конвективний, за якого теплоту, необхідну для випаровування вологи, зерну передає агент сушіння, частина якої витрачається на нагрівання зерна. Агент сушіння нагрівається в теплообміннику (калорифері), в який теплота вноситься теплоносієм – гарячими топковими газами (рис. 1.4, *а*), водою чи парою (рис. 1.4, *б*) або електронагрівником (рис. 1.4, *в*).

Основна відмінність теплоносія від агента сушіння в тому, що він не є робочим тілом, а тільки переносить теплоту.

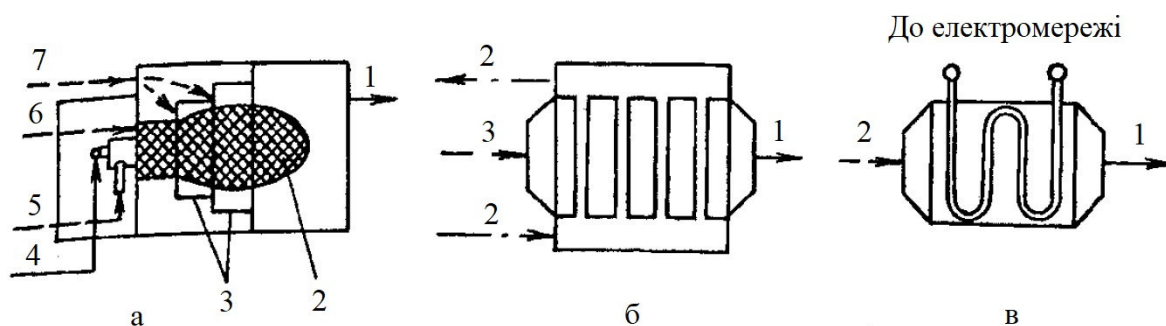


Рис. 1.4. Схеми здобуття агента сушіння зерна:

a – в топці, що працює на рідкому або газоподібному паливі [*1* – агент сушіння до сушарки; *2* – теплоносій (1...5 %); *3* – змішування; *4* – паливо; *5* – первинне дуття; *6* – вторинне дуття; *7* – зовнішнє повітря (95...99 %)]; *б* – у поверхневому калорифері (*1* – агент сушіння до сушарки; *2* – теплоносій; *3* – зовнішнє повітря); *в* – в електрокалорифері (*1* – агент сушіння до сушарки; *2* – зовнішнє повітря)

Під час нагрівання повітря в топці (рис. 1.4, *a*) агентом сушіння є суміш повітря з теплоносієм (топковими газами). Ця суміш відрізняється за хімічним складом від атмосферного повітря підвищеним вмістом вуглекислого газу, оксиду вуглецю, вуглеводнів та інших сполук. Це шкідливі канцерогенні сполуки, які можуть поглинатися зерном. У прямоточних шахтних сушарках концентрація теплоносія не перевищує 5 %, у камерних – 1...2 %. Витрати палива порівняно з поверхневими калориферами скорочуються приблизно в два рази. Тому топки (калорифери змішування) дуже поширені. Для здобуття агента сушіння у топках слід використовувати світле рідке (дизельне) та газоподібне паливо [15, 16].

Під час нагрівання повітря у поверхневому калорифері кількість вологи не змінюється, тобто $d_0 = d_1 = \text{const}$ (рис. 1.5). Процес нагрівання повітря зображується лінією *AB*, що починається в точці *A* на лінії температури t_0 і закінчується в точці *B* на лінії температури t_1 . Відносну вологість агента сушіння φ_1 (%) у точці *B* після калорифера

$$\varphi_1 = \varphi' \frac{d_1}{d'} \quad (1.17)$$

(де $\varphi' = 5$ %; значення d' для $\varphi' = 5$ %) знаходять на діаграмі *I-d* залежно від температури t_1 агента; $d_0 = d_1$ – вологовміст останнього до та після калорифера.

Процес отримання агента сушіння змішуванням зовнішнього повітря з топковими газами високої температури зображено лінією AB' (рис. 1.5), коли $d_1 > d_0$.

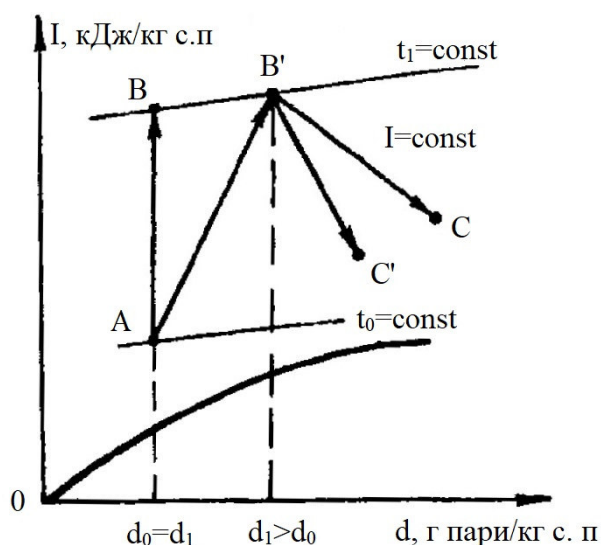


Рис. 1.5. Зображення на $I-d$ діаграмі процесів отримання агента сушіння та сушіння зерна

Під час згоряння палива виділяється додаткова кількість водяної пари, яка разом із топковими газами змішується із зовнішнім повітрям, що мало вологовміст d_0 . Після змішування вологовміст d агента сушіння збільшується ($d_1 > d_0$). Процес випаровування вологи із матеріалу в агент сушіння, що відбувається в реальній сушарці, на $I-d$ діаграмі зображується лінією $B'C'$; в ідеальній (теоретичній) сушарці, в якій непродуктивних витрат теплоти немає – лінією $B'C$, яка збігається з лінією $I = \text{const}$ (рис. 1.5).

Теорія сушіння включає статику, кінетику та динаміку. *Статика* вивчає взаємодію вологого матеріалу з повітрям до досягнення стану рівноваги. У статисти висвітлюються механізм процесу випаровування води з вільної поверхні та пов'язані з ним ізотерми сорбції і десорбції (зволоження та сушіння) матеріалу без розгляду тривалості цього процесу.

Кінетика вивчає характер проходження процесу з часом, зміну швидкості сушіння залежно від параметрів агента сушіння його температури, вологості та швидкості. Під кінетикою процесу сушіння розуміють зміни середнього вологовмісту $\bar{u}(r)$ та середньої температури $\bar{\theta}$ тіла протягом певного часу. Закономірності кінетики процесу дають змогу розрахувати кількість випареної

вологи із матеріалу та витрати теплоти на його сушіння. Часові зміни середніх вологовмісту і температури тіла визначаються закономірностями взаємодії його із зовнішнім тепловологоперенесенням.

Динаміка вивчає зв'язки вологи з матеріалом, характер її переміщення та зміни властивостей матеріалу під час сушіння, тобто механізм процесу залежно від фізико–хімічних властивостей матеріалу. Особливості процесу сушіння виявляють за характером зміни в часі вологовмісту U та температури θ , які залежать від взаємозв'язаного механізму перенесення вологи і теплоти всередині вологого матеріалу а також тепловологого обміну поверхні матеріалу з навколишнім середовищем. Питання кінетики та динаміки сушіння зерна тісно пов'язані між собою [1, 2, 21, 22]. Положення кінетики та динаміки сушіння зерна служать обґрунтуванням вибору режимів сушіння, інтенсифікації процесу, проектування нових типів і реконструкції діючих зерносушарок. При проектуванні сушарок тривалість технологічного процесу, необхідну робочу ємність апаратів, режими сушіння вибирають на основі дослідних даних, перевірених та уточнених на експериментальних зразках сушильних установок.

1.3 Експериментальні закономірності процесу сушіння зерна

Сушіння – нестационарний процес: вологість, температура матеріалу та швидкість його обезводнення змінюються з часом. У теорії сушіння усі зміни прийнято ілюструвати графічно у вигляді кривих (вологість – час), швидкості сушіння (швидкість – вологість) і температурних кривих (температура – вологість) [1, 2, 23–26]. Дані дістають під час сушіння невеликих зразків матеріалу, визначаючи у відповідні моменти часу його вологість та температуру. Параметри агента сушіння (температуру, швидкість, відносну вологість) у межах експерименту підтримують незмінними. Вологість матеріалу в процесі сушіння знаходять розрахунком за зменшенням маси вологи. Для цього через певні проміжки часу зважують матеріал, який висушують.

Для аналізу процесу сушіння зерна зручно користуватися суміщеним графіком кривих сушіння 1, швидкості сушіння 2 та температурної 3 (рис. 1.10) у функції часу. У стадії прогрівання зерна теплота, що підводиться до нього агентом сушіння, витрачається на нагрівання зерна. Його температура різко підвищується (ділянка $A''B''$), зростає швидкість сушіння (ділянка $A'B'$). На початку періоду I температура θ зерна досягає температури t_m мокрого термометра, а швидкість сушіння – свого максимального значення. Період I характеризується сталою швидкістю сушіння (ділянка $B'C'$); при цьому вологість зерна змінюється за прямою лінією (ділянка BC), а його температура залишається постійною і дорівнює t_m (ділянка $B''C''$).

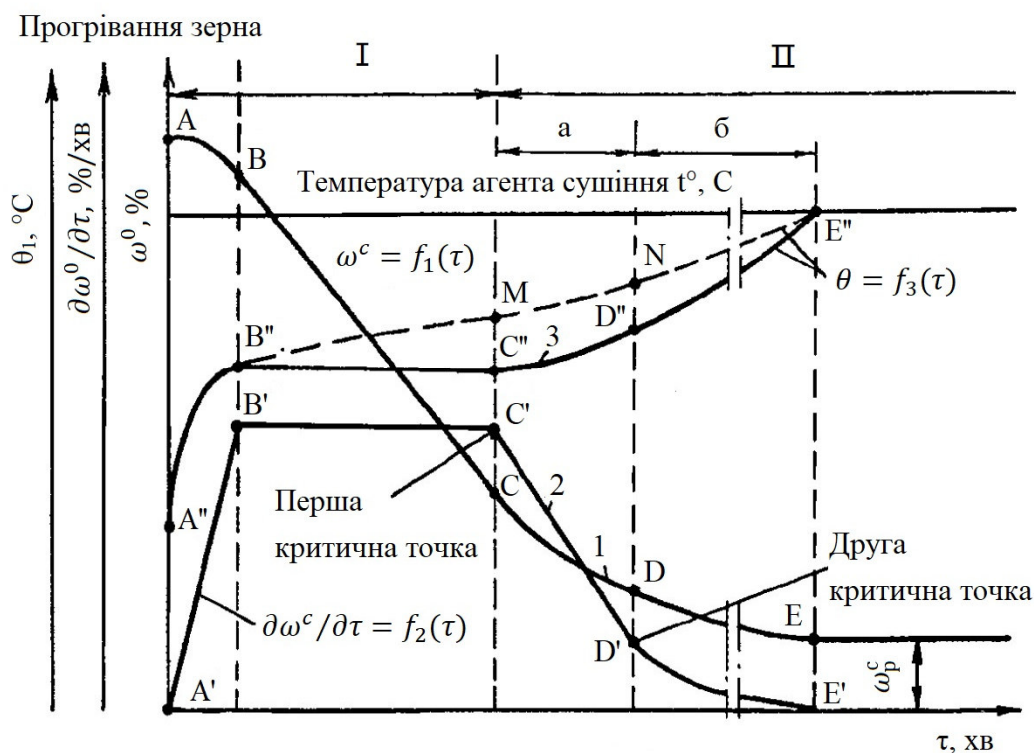


Рис. 1.6. Суміщений графік процесу сушіння зерна

Для більшості колоїдних капілярно–пористих тіл, до яких належить і зерно, температура навіть у періоді I неперервно збільшується (ділянка $B''M$).

Інтенсивність випаровування вологи у період сталої швидкості сушіння пропорційна різниці тисків водяної пари на поверхні зерна й у навколишньому середовищі. Швидкість сушіння залежить від параметрів агента сушіння

(температури, вологості та його швидкості) й визначається умовами зовнішньої дифузії вологи в навколишнє середовище. Але вже в цьому періоді для деяких матеріалів складаються умови, які порушують закономірності зовнішньої дифузії вологи, а спричинюються вони недостатнім підведенням вологи із внутрішніх частин матеріалу до поверхні та поглибленням зони випаровування. Це знаходить відображення у неперервному підвищенні температури зерна.

У періоді II (рис. 1.10) спостерігається уповільнення швидкості сушіння зерна, його вологість змінюється за кривою CDE , а швидкість сушіння – за кривою $C'D'E'$. Температура зерна підвищується (ділянки $C''D''E''$ або MNE''). Зменшення швидкості сушіння пояснюється видалянням більш міцно зв'язаної вологи із зерна.

Період спадної швидкості сушіння має дві зони: *зону зовнішньої* (зона *a*) та *внутрішньої* (зона *б*) дифузії вологи. Їх розділяє друга критична точка D' . У зоні зовнішньої дифузії вологи інтенсивність сушіння ще визначається зовнішніми умовами, але вже значною мірою обмежується підведенням вологи із внутрішніх шарів зерна. У зоні внутрішньої дифузії інтенсивність процесу слабо залежить від параметрів агента сушіння і майже повністю визначається законами внутрішнього переміщення вологи в зерні.

1.4 Огляд методів сушіння зерна

Існує кілька принципів класифікації методів сушіння [2, 39, 40]. Найзагальнішою є класифікація за способом підведення енергії:

1. теплові:

- a) конвективне сушіння;
- b) кондуктивне сушіння;
- c) терморадіаційне сушіння;
- d) сушіння у полі струмів високої частоти;

2. спеціальні:

- a) сушіння у вакуумі;
- b) сушіння обезводненим повітрям;

с) контактне сушіння;

3. механічні:

а) віджимання;

б) центрифугування.

У зерносушінні найпоширенішим є *конвективний метод* сушіння, за якого тепла енергія передається зерну від нагрітого газу (повітря або його суміші з продуктами згоряння палива). Те, що нагрітий газ водночас виступає як теплоносій та вологовбирач, зумовлює відносну простоту конструкцій конвективних сушарок. Під час конвекційного сушіння зерно може знаходитися в: щільному нерухомому, гравітаційно рухомому, псевдорозрідженому, віброкиплячому, падаючому або завислому стані. Стан зернового шару визначає активну поверхню зерна, що контактує з агентом сушіння, а значить, інтенсивність процесу [2, 3, 17]. Низький К.К.Д. конвективних сушарок (25...40 %) можна підвищити повторним використанням відпрацьованого агента сушіння.

Під час *кондуктивного* сушіння зерна теплота передається йому теплопровідністю від нагрітої поверхні труб, що обігрівуються паром, гарячою водою або газом. Водяна пара, яка випаровується із зерна, поглинається холодним або підігрітим повітрям, що подається у сушильну камеру. Швидкість сушіння залежить від температури гріючої поверхні та товщини зернового шару. Кондуктивне сушіння використовують на борошномельних і круп'яних заводах для підігрівання зерна та невеликого зниження його вологості перед переробленням, а також у комбінації з конвективним сушінням. Низький К.К.Д. кондуктивних зерносушарок пояснюється додатковою втратою теплоти на нагрівання гріючої поверхні. При цьому може спостерігатися перегрівання та погіршення якості зерна, що контактує з гріючою поверхнею.

Під час *терморадіаційного* сушіння підведення теплоти до зерна здійснюється завдяки застосуванню інфрачервоного випромінювання генераторами або сонячних променів. Природне сушіння зерна під сонячними променями проводять в суху та ясну погоду на спеціально обладнаних площадках. При цьому повністю зберігаються насінневі та продовольчі якості зерна,

прискорюється післязбиральне його дозрівання. Разом з тим сонячне зерносушіння трудомістке й залежить від метеорологічних умов.

Високочастотне нагрівання зерна ґрунтується на явищі поляризації. Під дією високих частот у вологому матеріалі полярні молекули води намагаються розташуватися своїми осями вздовж електричного поля. Відбувається тертя молекул між собою і в матеріалі виділяється теплота, а також виникає градієнт температури, спрямований усередину зернової маси, під дією якого волога переміщується до поверхні зерна.

Кількість виділеної теплоти залежить від напруженості електричного поля, частоти коливань та діелектричних властивостей зерна. У промислових установках використовують лампові генератори. К.К.Д. цих установок більш низький, ніж при конвективному сушінні.

Сушіння зерна під вакуумом дає змогу підвищити інтенсивність процесу завдяки зниженню барометричного тиску [2, 3]. Позитивним тут є те, що процес сушіння можна здійснювати при низьких температурах агента сушіння, що забезпечує зберігання природних властивостей зерна. Але значні витрати на утворення та підтримання вакууму не дають змоги впроваджувати цей метод у промислових масштабах.

Підвищити швидкість процесу можна використанням *обезводненого підігрітого повітря*. Залежно від способу зменшення вологовмісту повітря розрізняють сушіння за допомогою вологовбирачів (ізотермічне сушіння) – силікагелю, активованого вугілля (при цьому виникають додаткові витрати на обезводнення вологовбирачів) та сушіння за допомогою агента, пропущеного через холодильні установки і установки конденсації вологи. Але це потребує значних витрат електроенергії.

Ефективність *контактного* (сорбційного) зерносушіння залежить від температури та інших факторів, які характеризують стан і гігроскопічність зерна та сорбенту. Таке сушіння забезпечує краще зберігання якості зерна, але потребує витрат на перемішування і відокремлення зерна від сорбенту. Останнім часом його широко використовують в рециркуляційних сушарках, де змішуються два потоки

зерна з різною вологістю, а в деяких сушарках – із різною температурою. Як сорбент застосовується підсушене нагріте зерно, що циркулює в сушарці у замкненому контурі. Нагріте в сушарці до більш високої температури, ніж сире зерно, воно у тепловологообміннику віддає частину теплоти сирому зерну та зволожується у контакті з ним [2, 3, 7]. Інтенсивність міжзернового вологообміну залежить від різниці вологості, температури, кратності змішування сирого та рециркулюючого зерна. Вологообмін найінтенсивніше відбувається у перші 15...20 хв, після чого процес сповільнюється. За цей час вологість сирого зерна знижується на 2,5...3 %. Температура зерна вирівнюється вже через 1,5...2 хв.

За допомогою *механічних* методів сушіння зерна віджиманням або центрифугуванням видаляють механічно зв'язану чи поверхневу вологу, наприклад під час виходу зерна з мийного відділення млинів, на віджимних колонках.

Складовою процесу сушіння після нагрівання зерна є його охолодження. У прямоточних сушарках охолодження застосовується на кінцевій стадії сушіння, що пов'язано з необхідністю переведення зерна у рівноважний стан не тільки за вологістю, а й за температурою, з метою його тривалого зберігання. Температура зерна, що виходить із сушарки, може перевищувати температуру зовнішнього повітря не більш як на 10 °С. У багатьох рециркуляційних сушарках поряд з цим є ще й проміжне охолодження рециркулюючого зерна, яке дає змогу застосовувати інтенсифіковані режими сушіння з температурою агента сушіння 250...350 °С без перегрівання зерна і, крім того, забезпечує додаткове зняття вологи. Зерно охолоджують, продуваючи його зовнішнім повітрям. Інтенсивність охолодження залежить від параметрів повітря, товщини шару зерна та тривалості його охолодження [3, 7, 16, 17].

1.5 Характеристика станів зернового шару

Вивчення процесу сушіння зерна починають з *елементарного шару* завтовшки в одну зернину. Елементарний шар можна прийняти за межовий шар,

який безпосередньо контактує зі свіжим агентом сушіння, що надходить у шар будь-яких товщини та стану. Інтенсивність сушіння зростає з підвищенням температури агента сушіння, його швидкості, а також початкової вологості зерна [2, 3, 7].

У щільному нерухомому шарі поверхня зерна, що контактує з агентом сушіння, не змінюється. Інтенсивність сушіння визначається тепловологообміном між зерном і агентом сушіння. Товщину зернового шару приймають залежно від вологості в межах 0,6...3,5 м. У зв'язку з тим, що температура агента сушіння не може перевищувати допустимої температури нагрівання зерна, тривалість сушіння вимірюється годинами. Велику тривалість сушіння можна частково усунути періодичною зміною напрямку продування зернового шару.

Гравітаційно-рухомий щільний шар використовується в шахтних сушарках, коли зверху подається зерно, а знизу утворюється підпір. Завдяки повільному просуванню зерна в шахті з коробами (середня швидкість не перевищує 3...5 мм/с) шар розширюється та перемішується, шпаруватість його збільшується, що сприяє прискоренню сушіння. Товщина гравітаційно-рухомого шару 100...250 мм у сушарках з коробами та 300...500 мм із сітчастими стінками. Температури агента сушіння вищі, ніж у нерухомому шарі, і лежать в межах 50...160 °С; швидкість його у шарі зерна (0,3...0,5 м/с) не повинна призводити до порушення шару [3, 7].

Якщо крізь шар на сітці, пропускати агент сушіння з певною швидкістю, то шар розрихлюється, а потім переходить у стан, який нагадує киплячу рідину і називається *псевдорозрідженням*. Внаслідок інтенсивного перемішування забезпечуються рівномірне нагрівання та сушіння окремих зерен, процеси тепловологообміну інтенсифікуються, особливо біля сітки. Завдяки інтенсивному теплообміну зерно нагрівається до гранично допустимої температури за 1...3 хв залежно від температури агента сушіння. Швидкість випаровування вологи при цьому залишається сталою.

Зниження вологості зерна на 3...4 % супроводжується підвищенням його температури до 55...60 °С. Подальше сушіння призводить до перегрівання зерна. Тому доцільно застосовувати циклічне сушіння з чергуванням нагрівання –

оохолодження. Рациональніше використовувати псевдорозріджений шар для попереднього підігрівання зерна перед сушінням.

Віброкиплячий шар. Зерновий шар може бути переведено у псевдорозріджений стан дією на нього вібраційних коливань або спільною дією повітряного потоку та вібрації. Застосування вібрації дає змогу зменшити швидкість повітря нижче критичної та розрахувати витрату повітря, виходячи з необхідної кількості теплоти. Найбільше впливає на стан шару амплітуда коливань, яка для різних зернових культур становить 2...10 мм. Частоту коливань беруть у межах 20...30 Гц [3, 7, 22].

Падаючий шар застосовують під час нагрівання зерна у сушарках РД–2х25, У2–УЗБ–50, АІ–УСПІ, АІ–УЗМ та ін. Зерно падає зверху вниз в камері нагрівання, а агент сушіння піднімається знизу вгору. Тривалість перебування зерна у камері від 1,5...2 до 8...10 с, що залежить від висоти камери та швидкості зустрічного потоку агента сушіння (аеродинамічне гальмування), яку встановлюють на рівні, близькому до швидкості витання зерна (5,5...6 м/с), а також від конструкції гальмівних елементів. Тому використовують агент сушіння з високою температурою (від 200 до 350 °С та вище). Зниження вологи зерна становить лише 0,3...1%. У зв'язку з цим апарати з падаючим шаром застосовують не як самостійні сушарки, а як нагрівники зерна в комбінованих багатокамерних установках.

Завислий шар зерна досягається при швидкості агента сушіння більшій, ніж швидкість витання зерна; при цьому вся його поверхня бере участь у тепловологообміні з повітрям. Нагрівання та сушіння зерна відбуваються рівномірно, сушіння здійснюється у пневмотрубі, в яку зерно подають у потік агента сушіння. Стабільність пневмотранспорту досягається при середній швидкості агента сушіння 22...24 м/с. Тривалість перебування зерна у пневмотрубі (1... 1,5 с). Тому навіть для температури агента сушіння 350...400 °С вологість зерна знижується лише на 0,5...1 %. Зерно за 5...6 с нагрівається до гранично допустимої температури. Отже, апарати із завислим шаром так само, як із падаючим, доцільно використовувати тільки як нагрівники зерна в багатокамерних установках.

Технологічні схеми неперервно діючих сушарок поділяють на прямоточні та рециркуляційні. Технологічна схема *прямоточного* сушіння передбачає одноразове проходження зерна послідовно через сушильну й охолоджувальну камери. Для запобігання перегріванню зерна його вологість знижують не більш як на 6...8 %. За необхідністю більшого зниження вологості застосовують дво- або трикратне пропускання зерна через сушарку [1–3, 7]. Якщо температуру агента знизити до гранично допустимої температури нагрівання зерна, то сире зерно можна просушити і за одне пропускання. Але тривалість сушіння різко збільшується. В той же час повторне сушіння зерна з високою вологістю ускладнює організацію його поточного оброблення, знижує коефіцієнт використання сушильних потужностей, призводить до непродуктивних витрат на навантажувально–розвантажувальні роботи. Прямоточне сушіння потребує підбору партій зерна з однаковою початковою вологістю. Різниця за вологістю окремих партій зерна не повинна перевищувати 2...3 %.

На відміну від прямоточних, у рециркуляційних сушарках, у замкненому контурі неперервно рухається великий потік сухого (рециркулюючого зерна), який в кілька разів перевищує фактичну продуктивність сушарки. У цей потік неперервно додають сире зерно в об'ємі продуктивності сушарки, а відповідна йому кількість сухого зерна неперервно виводиться з контуру циркуляції. Для ефективної роботи рециркуляційних сушарок необхідно забезпечити рівномірний розподіл сирих і сухих зернин у суміші, що надходить до тепловологообмінника, тобто треба ретельно перемішувати суміш. Рециркуляційні сушарки не потребують підбору партій зерна за вологістю. Вони–допускають одночасне завантаження сушильної камери зерном різної вологості. Завдяки контактному тепловологообміну та багаторазовій циркуляції зерна відбувається вирівнювання його вологості [2, 3, 7]. З аналізу найпоширеніших рециркуляційних способів сушіння зерна випливає, що вдосконалення їх буде йти в напрямі використання двох контурів рециркуляції з підведенням до рециркулюючого зерна не зовнішнього повітря, а агента сушіння.

1.6 Режими сушіння зерна

Своєчасне правильно проведене сушіння зерна підвищує його стійкість під час зберігання, поліпшує продовольчі та насінневі якості зерна. Сушіння позитивно впливає на якість продукції у процесі перероблення зерна в борошно та крупу. Під *режимом сушіння зерна* розуміють сукупність певних параметрів агента сушіння та зерна: температури t_1 агента, початкової вологості ω_0 та гранично допустимої температури θ_{cp} нагрівання зерна [2, 7, 18]. Температура t_1 агента сушіння перед сушильною камерою визначає інтенсивність процесу нагрівання зерна та видалення з нього вологи, але максимальне її значення обмежене умовами зберігання якості зерна. Початкова вологість ω_0 зерна вагомо впливає на інтенсивність процесу його сушіння і визначає вибір гранично допустимих температур нагрівання зерна та максимальних температур агента сушіння.

Одним із найважливіших параметрів режиму сушіння є гранично допустима температура його нагрівання θ_{cp} . Застосовуючи граничні значення θ_{cp} , за яких повністю зберігаються показники якості зерна, можна дістати максимальну інтенсивність процесу. Режим, за якого забезпечується висока якість зерна та досягаються найкращі техніко–економічні показники роботи сушарки, називають *оптимальним*.

Розрізняють *м'який* і *жорсткий* режими сушіння. Перший характеризується невисокою температурою та швидкістю агента сушіння. Процеси нагрівання і сушіння зерна проходять з невисокою швидкістю. Жорсткий режим характеризується підвищеними температурою та швидкістю агента сушіння.

З економічної точки зору процес сушіння бажано проводити при жорсткому режимі з більш коротким строком процесу. Скоротити тривалість дії теплоти на зерно краще і в технологічному відношенні. Чим менше знаходиться зерно в нагрітому стані, тим більша гарантія збереження його якості. Разом з тим при жорсткому режимі сушіння можливе погіршення його якості через деформацію тканин і їх мікро– розтріскування. Але й м'який режим сушіння не гарантує зберігання якості зерна. Якщо сушіння триває занадто довго, то зерно пліснявіє.

При виборі режимів сушіння зерна слід приділяти увагу зберіганню біологічно активних речовин – ліпідів, що відіграють важливу роль в оцінці поживних цінностей зерна. Тому рекомендується сушити зерно пшениці за порівняно м'яких температурних режимів.

Якість зерна після сушіння залежить від механізму перенесення вологи. Ідеальним є режим сушіння, за якого зона випаровування знаходиться біля поверхні зерна. Волога рухається всередині зерна у вигляді рідини, виключається перегрівання його поверхні завдяки охолоджувальній дії процесу випаровування вологи з поверхні зернини. Підбором параметрів процесу сушіння можна уповільнити поглиблення зони випаровування всередину зерна і тим самим створити умови для рівномірного сушіння.

Інтенсивність сушіння визначається швидкістю підведення вологи із середини зерна до поверхні. Чим вища температура зерна, тим з більшою швидкістю переміщується в ньому волога. Для прискорення процесу сушіння ефективним є попереднє нагрівання зерна. Його проводять при підвищеній вологості повітря з тим, аби підведена теплота втрачалася тільки на нагрівання зерна. Далі його висушують за температури, близької до гранично допустимої, що забезпечує високу швидкість сушіння зерна. Режим сушіння пов'язаний із методом сушіння та конструктивними особливостями зерносушарок. У шахтних прямоточних і рециркуляційних сушарках без додаткових пристроїв для нагрівання зерна застосовують *одноступінчасті* режими, за яких у зону сушіння подають агент сушіння певної температури [7, 18]. Найпоширенішими є *двоступінчасті* режими сушіння зерна. При цьому в першу зону сушіння або при першому проходженні зерна через сушарку подають агент сушіння трохи меншої температури, а в другу зону або при повторному проходженні зерна через сушарку, коли його вологість уже нижча і термостійкість вища, – з підвищеною температурою, завдяки чому зерно нагрівається до більш високої температури.

Під час сушіння пшениці використовують *диференційовані* режими, за яких гранично допустима температура нагрівання зерна і температура агента сушіння залежать від початкової якості клейковини – міцної, доброї або слабкої. Сушіння

пшениці зі слабкою клейковиною при підвищеній температурі приводить до зміцнення клейковини, а отже, поліпшення її якості. Розрізняють режими з *неперервним* та *імпульсним (періодичним)* підведенням теплоти. В шахтних прямоточних зерносушарках застосовують режими сушіння з неперервним підведенням теплоти. Для прискорення сушіння зерна в шахтних рециркуляційних і камерних сушарках використовують режими з імпульсним підведенням теплоти, які називають *осцилюючими*. Перерви у подачі агента сушіння або короткочасне охолодження зерна сприяють вирівнюванню температури та вологості в окремих зернинах.

Велике значення для ефективності сушіння та зберігання якості зерна має *ізотермічний* режим. Від осцилюючих режимів він відрізняється тим, що замість проміжного охолодження рециркулюючого зерна здійснюють продування його агентом сушіння з невисокою температурою (80...100 °С), що значно інтенсифікує процес сушіння зерна, температура якого весь час залишається на рівні гранично допустимої. Гранично допустиму температуру зерна θ_{gr} треба вибирати залежно від біохімічних змін, що відбуваються в білковому комплексі зародка та ендосперму. Ці зміни характеризуються *ступенем денатурації білка* – складною функцією температури зерна, його вологості, тривалості нагрівання, а також властивостей білка. У кількісному відношенні дія цього комплексу чинників визначається швидкістю денатурації, пропорційною вологості зерна та температурі. Із підвищенням температури зерна на 10 °С (за постійної вологості) швидкість денатурації зростає в два – чотири рази; зі збільшенням вологості за постійної температури швидкість денатурації зерна підвищується: збільшення вологості на 3...4 % еквівалентно підвищенню температури на 10 °С. У початковій стадії денатурації спостерігається процес ренатурації. Завдяки цьому при зберіганні зерна розчинність альбумінів і глобулінів, а також енергія проростання та схожість відновлюються [2, 3, 7].

Допустиму температуру зерна насінневого призначення встановлюють з умов зберігання енергії його проростання та схожості. Із збільшенням вологості та тривалості перебування зерна в нагрітому стані допустиму температуру знижують.

Гранично допустиму температуру агента сушіння вибирають, виходячи з установлених значень максимальної температури зерна, його початкової вологості, а також способу ведення процесу. Запарювання спостерігається при сушінні зерна підвищеної вологості з низькою початковою температурою внаслідок дії на нього високих температур агента сушіння. На холодній поверхні зернин конденсується багато раніше випареної вологи з виділенням теплоти. Процес супроводжується зволоженням зернової маси та підвищенням її температури, що може зумовити зниження насінневих і технологічних властивостей зерна. При сушінні зерна в шахтних прямоточних сушарках запарювання легко уникнути, якщо у верхній частині сушарки товщина продувного шару зерна буде мінімальною, а швидкість агента сушіння – максимальною. При товщині продувного зернового шару близько 100 мм запарювання зерна не відбувається.

Основною ознакою загартовування оболонок зернин є втрата ними здатності пропускати вологу. Найвірогіднішим є загартовування свіжозібраного зерна, оболонки зернин якого мають знижену вологопровідність. Для попередження загартовування свіжозібраного зерна у прямоточних сушарках треба знижувати температуру агента і зерна.

1.7 Шляхи вдосконалення технології сушіння зерна

Завдання технології сушіння зерна полягає в розробленні методів керування процесами, що відбуваються в самому матеріалі – об'єкті сушіння, з метою здобуття продукту високої якості з регламентованими фізико–хімічними, структурно–механічними та органолептичними показниками.

Як критерій оптимальності вибирають мінімальну тривалість сушіння τ . Прагнення зменшити τ цілком істотне, оскільки при цьому скорочується час термічної дії на зерно і меншою мірою змінюються його властивості [2, 7].

Рушійними силами перенесення вологи всередині зерна під час його сушіння є градієнти вологовмісту, температури, загального тиску. Інтенсифікувати процес сушіння зерна можна збільшенням цих градієнтів. Однак для надмірно великих

градієнтів вологовмісту може відбутися розтріскування зерна, можливі перегрівання та псування поверхневих зернових шарів, при значних градієнтах тиску може відбутися розрив матеріалу. При сумісній дії рушійних сил потоки вологи можуть мати різні напрямки. Актуальним завданням є доцільне спрямоване використання рушійних сил, виявлення та використання нових рушійних сил (наприклад, електромагнітного чи магнітного поля, вакууму та ін.) [7].

При виборі методів попереднього оброблення та режимів сушіння зерна необхідно враховувати його термо– і вологостійкість, біологічну природу та структурно–механічні властивості, від яких залежить утворення тріщин. Встановлено, що при сушінні попередньо нагрітого зерна поверхневий градієнт вологовмісту менший, ніж при звичайному конвективному сушінні, тобто зона випаровування розташовується поблизу зовнішньої поверхні матеріалу, до якої волога рухається у вигляді рідини. Це запобігає перегріванню поверхні матеріалу та сприяє зберіганню і поліпшенню якості зерна. Якщо розчинені речовини треба спрямувати всередину зернової маси, необхідно піддати зерно досить інтенсивному тепловому удару, а потім створити умови для його повільного охолодження. Іноді треба зовсім виключити переміщення рідини всередині матеріалу, щоб зберегти цінні розчинені речовини (вітаміни, ферменти та ін.). Тоді доцільними стають методи сушіння, при яких волога переміщується всередині зернової маси у вигляді пари.

Таким чином, змінюючи режим сушіння, можна змінювати механізм перенесення вологи, а отже, й властивості матеріалу – об'єкта сушіння.

Висновки за розділом

За результатами аналізу в 1–му розділі встановлено наступне:

1. Внаслідок низької теплопровідності теплота в зерновій масі затримується у шарі, що контактує з гарячими поверхнями сушарки. Зерно в цьому шарі може перегрітися, а якість його погіршиться. Тому потрібно вдаватися до заходів, що попереджають перегрівання зерна: покриття гарячих поверхонь сушарки тепловою ізоляцією; виготовлення їх із матеріалів з низькою теплопровідністю; усунення прямого контакту зерна в небезпечній зоні з гарячими газами; здійснення раціонального режиму роботи випускного механізму та ін.

2. Густина теплового потоку на поверхні та кількість теплоти, що пройшла крізь поверхню зерна, пропорційні коефіцієнту теплосасвоєння. Це треба враховувати для розроблення та експлуатації систем дистанційного і місцевого контролю температури зерна та газів у зерносушарці. Внаслідок низьких значень коефіцієнта теплосасвоєння зернового шару й повітря, прогрівання масивних вимірювальних перетворювачів температури відбувається повільно, що призводить до запізнювання їх показів, тому доцільна їх заміна на сучасні швидкодіючі цифрові.

3. Органічні та неорганічні речовини, що входять до складу зерна і виконують певні функції в його життєвих процесах, по–різному реагують на нагрівання зерна під час його сушіння і по–різному впливають на основні властивості зерна. У процесі сушіння зерно може втратити свою життєдіяльність, знизити товарно–продовольчі якості. Термостійкість зерна характеризується максимальною температурою нагрівання θ_{max} , за якої забезпечуватиметься повне зберігання всіх якісних показників зерна. Межа нульового ступеня денатурації білків може бути покладена в основу вибору режиму сушіння зерна. Особливу увагу слід приділяти зрілості зерна. Оболонки свіжозібраного зерна, як ендосперм і зародок, ще недостатньо затверділи і вологопровідна здатність їх знижена. У зв'язку з цим термостійкість такого зерна знижується порівняно із зерном, що пройшло післязбиральне дозрівання. Щоб зберегти якість свіжозібраного зерна,

його сушать, використовуючи знижені температуру агента сушіння (на 20...30°C) та температуру зерна (на 10°C).

4. Із численних методів теплового сушіння найпоширенішим є конвективний, за якого теплова енергія передається зерну від нагрітого газу (повітря або його суміші з продуктами згоряння палива). Те, що нагрітий газ водночас виступає як теплоносій та вологовбирач, зумовлює відносну простоту конструкцій конвективних сушарок. Під час конвекційного сушіння зерно може знаходитися в щільному нерухомому, гравітаційно рухомому, псевдорозрідженому, віброкиплячому, падаючому або завислому стані. Стан зернового шару визначає активну поверхню зерна, що контактує з агентом сушіння, а значить, інтенсивність процесу.

5. Швидкість сушіння залежить від параметрів агента сушіння (температури, вологості та його швидкості) й визначається умовами зовнішньої дифузії вологи в навколишнє середовище.

6. Складовою процесу сушіння після нагрівання зерна є його охолодження. У прямоточних сушарках охолодження застосовується на кінцевій стадії сушіння, що пов'язано з необхідністю переведення зерна у рівноважний стан не тільки за вологістю, а й за температурою, з метою його тривалого зберігання. Температура зерна, що виходить із сушарки, може перевищувати температуру зовнішнього повітря не більш як на 10 °C.

7. Своєчасне правильно проведене сушіння зерна підвищує його стійкість під час зберігання, поліпшує продовольчі та насінневі якості зерна. Сушіння позитивно впливає на якість продукції у процесі перероблення зерна в борошно та крупу.

8. Під режимом сушіння зерна розуміють сукупність певних параметрів агента сушіння та зерна: температури t_1 агента, початкової вологості ω_0 та гранично допустимої температури θ_{zp} нагрівання зерна.

9. При виборі методів попереднього оброблення та режимів сушіння зерна необхідно враховувати його термо- і вологостійкість, біологічну природу та структурно-механічні властивості, від яких залежить утворення тріщин.

Встановлено, що при сушінні попередньо нагрітого зерна поверхневий градієнт вологовмісту менший, ніж при звичайному конвективному сушінні, тобто зона випаровування розташовується поблизу зовнішньої поверхні матеріалу, до якої волога рухається у вигляді рідини. Це запобігає перегріванню поверхні матеріалу та сприяє зберіганню і поліпшенню якості зерна.

10. За результатами аналізу властивостей зерна і процесів сушіння, як компроміс по якості та вартості приймаємо за основу створення нової міні-сушарки шахтну прямоточну зерносушарку.

РОЗДІЛ 2

ПОДАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ МОДЕЛЛЮ З ПРОСТОРОВИМ РОЗПОДІЛЕННЯМ ПАРАМЕТРІВ

2.1. Математичне моделювання сушарки як об'єкта з розподіленими параметрами

2.1.1. Загальна характеристика об'єктів з просторовим розподіленням параметрів

У сушарці таких об'єктах технологічні параметри поступово розподіляються вздовж певних координат. При математичному моделюванні таких об'єктів не можна виділити (як в об'єктах із зосередженими параметрами) скінченну за розмірами акумулюючу ємність. Виділяють лише безмежно малу акумулюючу ємність, що є деяким тонким просторовим творенням, розташованим перпендикулярно напрямку зміни визначального параметра [64, 68, 76]. Математичне моделювання об'єктів з розподіленими параметрами включає складання балансних рівнянь для таких безмежно малих ємностей. Отримані рівняння статички чи динаміки безмежно малих акумулюючих ємностей самі по собі не є математичними моделями. До них необхідно додати граничні умови, а для динамічних ще і початкові умови.

Моделювання сушарки як технологічного об'єкта з просторовим розподіленням параметрів пов'язано з врахуванням напрямків зміни технологічних параметрів [76]. Вони можуть змінюватися в одному просторовому напрямку,

наприклад, осі X , якщо змінюється температура в шарі зерна. Можлива також радіальна зміна параметра, наприклад, зміна температури зерна в циліндричному корпусі сушарки. Існує поєднання радіального та лінійного розподілення визначального параметра, а також сферичне розподілення.

У всіх цих випадках підхід до раціонального вибору нескінченно малої акумулюючої ємності буде різним: це може бути пластина нескінченно малої товщини у випадках одномірного лінійного розподілення параметру, прямокутник чи паралелепіпед нескінченно малих розмірів у випадках 2-х чи 3-х мірного лінійного розподілення, циліндр скінченного діаметру та нескінченно малої товщини у випадках радіального розподілення, порожниста сфера (оболонка) нескінченно малої товщини у випадку сферичного розподілення параметру [76]. Раціональний вибір форми та місця розташування нескінченно малої ємності зв'язаний з об'ємними формами об'єкта моделювання та з напрямками просторового розподілення визначальних параметрів. Нескінченно мала акумулююча ємність повинна бути розміщена в довільному місці об'єкта моделювання. Граничні зміни визначального параметра в просторових межах об'єкта задаються граничними умовами. Граничні умови визначають діапазон змін визначальних параметрів і, крім того, визначають можливості просторового розташування вибраної нескінченно малої ємності. Щоб вибрану нескінченно малу акумулюючу ємність можна було віднести до кожної точки об'єкта моделювання, необхідно вибрати систему координат і розташувати її за напрямками зміни визначального параметра.

Виходячи з цього, можна зробити узагальнення, що математичне моделювання сушарки як об'єкта з розподіленими параметрами пов'язано з певними просторовими системами координат, в яких розташовують об'єкт моделювання у відповідності з напрямками розподілення (зміни) визначального параметра.

2.1.2. Просторові системи координат та їх застосування для моделювання процесів у сушарці

Для просторового представлення процесу в сушарках прямокутної конфігурації будемо використовувати трьохмірну декартову систему координат. Полярну систему можна представити у вигляді циліндричної або сферичної системи координат.

У циліндричній системі точка у просторі визначається довжиною радіуса, кутом його повороту та лінійною координатою. Така система зручна для представлення процесів у циліндрі чи товстостінній трубі. У сферичній системі точка у просторі визначається довжиною радіуса, а також двома кутами. Сферична система зручна для опису поширення теплового потоку із точечного джерела, наприклад, в кожній зернині сушарки. Для моделювання процесу теплопередачі в сушарці з використанням декартової системи координат приймемо, що тепловий потік має місце в однорідному матеріалі, теплофізичні властивості якого не залежать від температури та часу. Виділимо в сушарці нескінченно малу акумулюючу ємність у вигляді паралелепіпеда із сторонами dx , dy , dz і об'ємом $dV = dx dy dz$. Розташуємо його так, щоб грані були паралельні площинам декартової системи координат (рис. 2.1). Визначимо вектор теплового потоку, що проходить через елемент dV , через його грані $dydz$, $dxdz$ та $dxdy$:

$$Q_x = -\lambda \frac{d\theta(x,y,z)}{dx} dydz, \quad (2.1)$$

$$Q_y = -\lambda \frac{d\theta(x,y,z)}{dy} dxdz, \quad (2.2)$$

$$Q_z = -\lambda \frac{d\theta(x,y,z)}{dz} dxdy, \quad (2.3)$$

де $\theta(X, Y, Z)$ – температура в об'ємі dV ; λ – коефіцієнт теплопровідності зернового середовища.



Рис. 2.1. Схема для моделювання теплового потоку в зерновому середовищі

Із елементарного об'єму зерна dV складові вектора теплового потоку виходять через протилежні грані дещо зміненими:

$$Q_{x+dx} = Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx; \quad (2.4)$$

$$Q_{y+dy} = Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy; \quad (2.5)$$

$$Q_{z+dz} = Q_z + \frac{\partial Q_z}{\partial z} dz; \quad (2.6)$$

Значення похідних $\frac{\partial Q_x}{\partial x}$, $\frac{\partial Q_y}{\partial y}$, $\frac{\partial Q_z}{\partial z}$ з врахуванням виразів (2.1), (2.2) та (2.3):

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial \theta(x, y, z)}{\partial x} dydz \right) = -\lambda \frac{\partial^2 \theta(x, y, z)}{\partial x^2} dydz; \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(-\lambda \frac{\partial \theta(x, y, z)}{\partial y} dxdz \right) = -\lambda \frac{\partial^2 \theta(x, y, z)}{\partial y^2} dxdz; \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial Q_z}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(-\lambda \frac{\partial^2 \theta(x, y, z)}{\partial z} dxdy \right) = -\lambda \frac{\partial^2 \theta(x, y, z)}{\partial z^2} dxdy. \quad (2.9)$$

Рівняння теплового балансу в динаміці для елементарного об'єму зерна dV :

$$Q_x + Q_y + Q_z - Q_{x+dx} - Q_{y+dy} - Q_{z+dz} + Q_q = Q_a, \quad (2.10)$$

де Q_q – теплота, що виділяється в об'ємі dV за рахунок хімічних чи фізичних перетворень,

$$Q_q = dVq = qdxdydz, \quad (2.11)$$

q – питомий об'ємний тепловий ефект перетворень,

Q_a – теплота, що акумулюється в об'ємі зерна dV за рахунок зміни температури $\theta(X, Y, Z)$ у часі,

$$Q_a = \frac{\partial(dVpc\theta(x, y, z, t))}{\partial t} = pc \frac{\partial\theta(x, y, z, t)}{\partial t} dxdydz, \quad (2.12)$$

p та c – відповідно щільність та теплоємність матеріалу, в якому виділено об'єм dV .

Підставивши (2.1),..., (2.9), (2.11) та (2.12) в рівняння динаміки (2.10) отримаємо:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 \theta(x, y, z, t)}{\partial x^2} dxdydz + \frac{\partial^2 \theta(x, y, z, t)}{\partial y^2} dxdy + \frac{\partial^2 \theta(x, y, z, t)}{\partial z^2} dxdydz \right) + qdxdydz = pc \frac{\partial \theta(x, y, z, t)}{\partial t} dxdydz \quad (2.13)$$

Розділимо всі складові отриманого рівняння на $pcdxdydz$:

$$a \left(\frac{\partial^2 \theta(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{pc} = \frac{\partial \theta(x, y, z, t)}{\partial t}, \quad (2.14)$$

де $a = \frac{\lambda}{pc}$

Позначивши:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \nabla^2 \theta, \quad (2.15)$$

отримаємо:

$$a\nabla^2\theta(x, y, z, t) + \frac{q}{\rho c} = \frac{\partial\theta(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (2.16)$$

Рівняння (2.13) чи (2.16) є рівнянням динаміки теплового режиму нескінченно малої акумулюючої ємності елементарного об'єму dV зерна.

2.1.3. Математична модель теплових процесів у сушарці з врахуванням граничних умов

Рівняння (2.13) можна поширити на весь об'єм зерна, даючи відповідні значення просторовим координатам x, y, z . Сушарка має просторові границі, на яких визначальний параметр зв'язаний з навколишнім середовищем. Цей зв'язок подано граничними умовами. Динамічні моделі включають також початкові умови визначального параметра.

В залежності від типу теплообміну в сушарці використовують граничні умови чотирьох родів [64, 76]:

– умови 1-го роду визначають значення визначального параметра на границях об'єкта, коли координата X приймає граничні значення від $X=0$ до $X=l$:

$$\theta(t, x)|_{x=0} = \theta_0(t); \quad (2.17)$$

$$\theta(t, x)|_{x=l} = \theta_1(t); \quad (2.18)$$

– умови 2-го роду задають значення теплового потоку на границях об'єкта:

$$-\lambda \frac{\partial\theta(x, t)}{\partial x} |_{x=x_0} = q_0(t), \quad (2.19)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, $q_0(t)$ – тепловий потік;

– умови 3–го роду визначають закон теплообміну між середовищами на границях об'єкта, наприклад, під час конвективного теплообміну:

$$-\lambda \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = \alpha [\theta(x, t) \Big|_{x=x_1} - \theta_1(t)], \quad (2.20)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі; $\theta_1(t)$ – температура середовища, яке контактує з об'єктом;

– умови 4–го роду визначають теплообмін двох твердих тіл, за яких має місце рівність температур та теплових потоків на границях між ними:

$$\begin{aligned} \theta(x, t) \Big|_{x=x_1} &= \theta_1(x, t) \Big|_{x=x_1}, \\ -\lambda \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=x_1} &= -\lambda \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=x_1}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Для сушарки з просторовим розподіленням температури і вологості мають місце граничні умови 3–го роду. Дослідження динаміки проводиться в області часових характеристик. Розв'язком диференціального рівняння динаміки є сімейство часових характеристик. Конкретизація часової характеристики пов'язана із завданням початкових умов, тобто значення визначального параметра в початковий момент часу. Наприклад, задавання початкової температури зерна $\theta(x, t)$ в сушарці [71, 72]:

$$\theta(x, t) \Big|_{t=0} = \theta_0(x). \quad (2.22)$$

2.2. Статичні теплові режими в зерносушарці

Для одномірного розподілення (2.21) в просторі – це диференціальні рівняння з просторовою незалежною змінною x , для 2–х чи 3–х мірного розподілення це диференціальні рівняння у частинних похідних з просторовими незалежними змінними x, y, z [76]. Статичні режими об'єктів з розподіленими параметрами

можна отримати шляхом складання балансних рівнянь для нескінченно малих ємностей без врахування зміни визначальних параметрів у часі, або з динамічних моделей шляхом виключення часу t :

$$\frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} = 0.$$

Статичну модель зерносушарки з трьохмірним розподіленням у просторі параметрів у декартовій системі координат можна отримати із рівняння динаміки (2.13) та граничних умов, наприклад 3-го роду (2.20), прийнявши, що змінні моделі не залежать від часу:

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 \theta(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y, z)}{\partial z^2} \right) = -\frac{q}{pc}, \quad (2.23)$$

з граничними умовами 3-го роду:

$$\begin{cases} -\lambda \frac{\partial \theta(x, y, z)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_x [\theta_0 - \theta(x, y, z)|_{x=0}]; \\ -\lambda \frac{\partial \theta(x, y, z)}{\partial y} \Big|_{x=0} = \alpha_y [\theta_0 - \theta(x, y, z)|_{x=0}]; \\ -\lambda \frac{\partial \theta(x, y, z)}{\partial z} \Big|_{x=0} = \alpha_z [\theta_0 - \theta(x, y, z)|_{x=0}]. \end{cases} \quad (2.24)$$

Якщо отримувати статичну модель з балансних рівнянь для акумулюючої ємності, то загальна методика залишається такою ж, як в 2.1.2. Тобто розглядаються балансні рівняння для нескінченно малої акумулюючої ємності зерна dV . Тільки для статичної моделі буде незалежність змінних від часу, а значить відсутність акумуляції в об'ємі dV , що викликається зміною в часі визначального параметра. Необхідні для моделювання граничні умови будуть мати такий же вигляд як і граничні умови, що наведені в 2.1.2. Відмінністю буде лише відсутність залежності змінних від часу. Дослідження статичної моделі сушарки реалізується розв'язуванням рівнянь статички з врахуванням граничних умов. Отриманий у цьому випадку розв'язок статичної моделі, як гладка функція просторових координат, визначає гладке розподілення визначального параметра вздовж просторових координат. Це дозволяє обмежити кількість датчиків.

Розглянемо статичну модель розподілу температури в сушарці на прикладі одномірного розподілення у декартовій системі. Щоб отримати залежність для розрахунку одномірного теплового поля в шарі зерна товщиною δ із статичної моделі ((2.23) та (2.24)) потрібні рівняння:

$$\alpha \frac{d\theta(x)}{dx^2} = -\frac{q}{\rho c}, \quad (2.25)$$

$$\begin{cases} -\lambda \frac{d\theta(x)}{dx} \Big|_{x=0} = \alpha[\theta_0 - \theta(x)|_{x=0}], \\ -\lambda \frac{d\theta(x)}{dx} \Big|_{x=\delta} = \alpha_1[\theta(x)|_{x=\delta} - \theta_1], \end{cases} \quad (2.26)$$

де θ_0 та θ_1 зовнішні температури.

Таким чином, необхідно отримати залежність:

$$\theta(x) = f(\theta_0, \theta_1). \quad (2.27)$$

Спростимо (2.25), враховуючи (2.14):

$$\frac{d^2\theta(x)}{dx^2} = -\frac{q}{\lambda}. \quad (2.28)$$

Розв'язком рівняння (2.28) буде парабола:

$$\theta(x) = C_0 + C_1x - \frac{q}{2\lambda}x^2. \quad (2.29)$$

Для визначення констант інтегрування C_0 та C_1 , скористуємося граничними умовами (2.26). Для цього потрібно мати, крім виразу $\theta(x)$, вираз для $\frac{d\theta(x)}{dx}$.

Знайдемо похідну шляхом диференціювання виразу (2.29):

$$\frac{d\theta(x)}{dx} = C_1 - \frac{q}{\lambda}x. \quad (2.30)$$

Підставимо вирази (2.29) та (2.30) в рівняння граничних умов (2.26) з врахуванням значення в них X :

$$\begin{cases} -\lambda C_1 = \alpha(\theta_0 - C_0), \\ -\lambda \left(C_1 - \frac{q}{\lambda} \delta \right) = \alpha_1 \left(C_0 + C_1 \delta - \frac{q}{2\lambda} \delta^2 - \theta_1 \right). \end{cases} \quad (2.31)$$

Розв'яжемо систему рівнянь (2.31) відносно C_0 та C_1 :

$$C_0 = \frac{\theta_0 \left(\delta + \frac{\lambda}{\alpha_1} \right) + \frac{\lambda}{\alpha} \theta_1 + q \frac{\delta}{\alpha} \left(\frac{\lambda}{\alpha_1} + \frac{\delta}{2} \right)}{\delta + \frac{\lambda}{\alpha_1} + \frac{\lambda}{\alpha}}, \quad (2.32)$$

$$C_1 = \frac{\theta_1 + q \frac{\delta}{\lambda} \left(\frac{\lambda}{\alpha_1} + \frac{\delta}{2} \right) - \theta_0}{\delta + \frac{\lambda}{\alpha_1} + \frac{\lambda}{\alpha}}. \quad (2.33)$$

Підставивши C_0 та C_1 в (2.29) та дещо спростивши, отримаємо рівняння теплового поля в шарі зерна:

$$\begin{aligned} \theta(x) = k \left[\theta_0 \left(\frac{\delta - x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_1} \right) + \theta_1 \left(\frac{x}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} \right) \right] + \\ + q \frac{k \delta^2}{\lambda} \left\{ \left(\frac{\lambda}{\alpha \delta} + \frac{x}{\delta} \right) \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{2\lambda} \right) - \frac{1}{k} \left(\frac{x}{\delta} \right)^2 \right\}, \end{aligned} \quad (2.34)$$

де

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_1}}.$$

Із розв'язку статичної моделі (2.34) отримаємо лінійні залежності визначальної температури в $\theta(x)$ від значень температур тобто θ_0 та θ_1 :

$$\theta(x) = k \theta_0 \left(\frac{\delta - x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_1} \right), \quad (2.35)$$

$$\theta(x) = k \left(\frac{x}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} \right) \theta_1. \quad (2.36)$$

які є гладкими функціями від X , що важливо враховувати при розташуванні датчиків.

2.3. Отримання передаточних функцій процесів в зерносушарці

Особливістю структури математичних моделей сушарки як об'єкта з розподіленими параметрами є те, що рівняння статички чи динаміки зв'язує між собою лише внутрішні змінні, зовнішній вплив визначають граничні умови [73, 76]. Передаточна функція представляє собою відношення зображення за Лапласом вихідної змінної об'єкта до вхідної за нульових початкових умов. Вихідною змінною є визначальний параметр, розподілений в просторі. В зерносушарці, визначальним параметром, а значить і виходом об'єкта, є температура та вологість, в певній точці простору $(\theta(x, t)|_{x=x_1})$.

Для сушарки, як вхідний параметр є температура одного із середовищ, з яким контактує зерно. Прикладом може бути гранична умова 3-го роду (2.26):

$$-\lambda \left. \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \right|_{x_0} = \alpha(\theta_0(t) - \theta(x, t)|_{x_0}), \quad (2.37)$$

Де входом об'єкта може бути температура зовнішнього середовища $\theta_0(x)$, якщо $\theta(x, t)$, – визначальний параметр. Для отримання передаточної функції каналу $\theta_0(x) \rightarrow \theta(x, t)$ з динамічної моделі, що представлена рівнянням динаміки нескінченно малої акумулюючої ємкості та рівняннями граничних умов, необхідно звести ці рівняння в одне і розв'язати його відносно вихідної величини та провести перетворення рівнянь. Для того щоб звести рівняння динаміки нескінченно малої

акумулюючої ємкості та граничних умов, необхідно розв'язати рівняння динаміки, тобто його інтегрувати і визначити константи інтегрування з використанням граничних умов. Рівняння динаміки нескінченно малої акумулюючої ємкості можна записати в приростах, що забезпечує полегшення перетворення Лапласа в зв'язку з нульовими початковими умовами всіх змінних та їх похідних. Методику отримання передаточних функцій теплових процесів в зерносушарці розглянемо для рівняння динаміки одномірного теплового потоку, отриманого з рівняння динаміки (2.13) з врахуванням, того що $\frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$, $\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$.

Рівняння (2.13) набуває вигляду:

$$\alpha \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = -\frac{q(t)}{\rho c}, \quad (2.38)$$

з граничними умовами:

$$-\lambda \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \Big|_{x_0} = \alpha_0 [(\theta_0(t) - \theta(x, t)|_{x_0})], \quad (2.39)$$

$$-\lambda \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \alpha_1 [(\theta_0(x, t)|_{x=\delta} - \theta_1(t))]. \quad (2.40)$$

Така модель має місце при моделюванні теплового потоку через шар зерна з температурами зовнішніх середовищ з одного боку $\theta_0(t)$, а з другого – $\theta_1(t)$. Розподілена по товщині шару температура в $\theta(x, t)$ буде вихідною величиною, а температури середовищ, з якими контактує зерно – $\theta_0(t)$ та $\theta_1(t)$, будуть входами. Таким чином, можна виділити в цьому об'єкті два канали з передаточними функціями:

$$W_{1(p)} = \frac{\Delta \theta(x, p)}{\Delta \theta_0(p)} \quad (2.41)$$

$$W_{2(p)} = \frac{\Delta \theta(x, p)}{\Delta \theta_1(p)} \quad (2.42)$$

де p – оператор Лапласа.

Отримаємо передаточну функцію (2.41) із рівняння динаміки нескінченно малої акумулюючої ємкості (2.38) та граничних умов (2.39), (2.40).

Рівняння динаміки (2.38) та граничних умов (2.39), (2.40) у приростах:

$$\alpha \frac{\partial^2 \Delta\theta(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\partial \Delta\theta(x, t)}{\partial t} = \frac{\Delta q(t)}{pc}, \quad (2.43)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial \Delta\theta(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha_0 (\Delta\theta_0(p) - \theta(x, p)|_{x_0}), \quad (2.44)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial \Delta\theta(x, t)}{\partial x} \right|_{x=\delta} = \alpha_1 (\Delta\theta(x, t)|_{x=\delta} - \Delta\theta_1(t)). \quad (2.45)$$

Перетворимо рівняння (2.43), (2.44), (2.45) за Лапласом, приймаючи $\frac{\partial}{\partial t} = p$ та $\Delta\theta(x, t) = \theta(x, p)$; $\Delta\theta(t) = \theta(t)$, $\Delta\theta_1(t) = \theta_1(t)$:

$$\alpha \frac{d^2 \Delta\theta(x, p)}{dx^2} - p\theta(x, p) = \frac{q(p)}{pc}, \quad (2.46)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial \theta(x, p)}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha_0 (\theta_0(p) - \theta(x, p)|_{x_0}), \quad (2.47)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial \theta(x, p)}{\partial x} \right|_{x=\delta} = \alpha_1 (\theta(x, p)|_{x=\delta} - \Delta\theta_1(p)). \quad (2.48)$$

Рівняння (2.46) є звичайним лінійним диференціальним рівнянням 2-го порядку. Його розв'язок:

$$\theta(x, p) = \theta_{\text{Вим}} + \theta_{\text{В}}, \quad (2.49)$$

$$\theta_{\text{Вим}} = -\frac{q(p)}{ppc}; \quad \theta_{\text{В}} = C_0 e^{S_1 x} + C_1 e^{S_2 x}, \quad (2.50)$$

де S_1 , та S_2 , – корені характеристичного рівняння;

p – щільність зернового шару

$$\frac{\alpha}{p} S^2 + 1 = 0. \quad (2.51)$$

Звідки

$$S_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \quad (2.52)$$

З врахуванням (2.50) та (2.52) вираз (2.49) можна записати так:

$$\theta(x, p) = -\frac{q(p)}{p c} + C_0 e^{\frac{x\sqrt{p}}{\alpha}} + C_1 e^{-\frac{x\sqrt{p}}{\alpha}} \quad (2.53)$$

Константи інтегрування C_0 та C_1 , визначимо із граничних умов (2.46) та (2.48). Для цього із виразу (2.53) знайдемо похідну за координатою x :

$$\frac{d\theta(x, p)}{dx} = C_0 \sqrt{\frac{p}{\alpha}} e^{\frac{x\sqrt{p}}{\alpha}} + C_1 e^{-\frac{x\sqrt{p}}{\alpha}} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \quad (2.54)$$

Підставимо вирази (2.53) та (2.54) в рівняння граничних умов (2.47) та (2.48):

$$\begin{aligned} & -\lambda \left(C_0 \sqrt{\frac{p}{\alpha}} e^{\frac{x\sqrt{p}}{\alpha}} + C_1 e^{-\frac{x\sqrt{p}}{\alpha}} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right)_{x=0} = \\ & = \alpha_0 \left[\theta_0(p) \left(-\frac{q(p)}{p c} + C_0 e^{\frac{x\sqrt{p}}{\alpha}} + C_1 e^{-\frac{x\sqrt{p}}{\alpha}} \right)_{x=0} \right]; \\ & -\lambda \left(C_0 \sqrt{\frac{p}{\alpha}} e^{\frac{x\sqrt{p}}{\alpha}} + C_1 e^{-\frac{x\sqrt{p}}{\alpha}} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right)_{x=\delta} = \\ & = \alpha_1 \left[\left(-\frac{q(p)}{p c} + C_0 e^{\frac{x\sqrt{p}}{\alpha}} + C_1 e^{-\frac{x\sqrt{p}}{\alpha}} \right)_{x=\delta} - \theta_1(p) \right]. \end{aligned}$$

Після підстановки значень $X=0$ та $X=\delta$, що відповідають граничним умовам, отримаємо:

$$-\lambda \left(C_0 \sqrt{\frac{p}{\alpha}} + C_1 e \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right) = \alpha_0 \left[\left(\theta_0(p) \left(-\frac{q(p)}{pc} - C_0 - C_1 \right) \right) \right];$$

$$-\lambda \left(C_0 \sqrt{\frac{p}{\alpha}} e^{\delta \sqrt{\frac{p}{\alpha}}} + C_1 e \sqrt{\frac{p}{\alpha}} e^{-\delta \sqrt{\frac{p}{\alpha}}} \right) = \alpha_1 \left[-\frac{q(p)}{pc} + C_0 e^{\delta \sqrt{\frac{p}{\alpha}}} + C_1 e^{-\delta \sqrt{\frac{p}{\alpha}}} - \theta_1(p) \right].$$

Із отриманих рівнянь можна визначити константи інтегрування C_0 та C_1 . Для цього згрупуємо складові цих рівнянь з константами C_0 та C_1 :

$$\left(1 - \frac{\lambda}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right) C_0 + \left(1 + \frac{\lambda}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right) C_1 = \theta_0(p) - \frac{q(p)}{pc} \quad (2.55)$$

$$\left(\frac{\lambda}{\alpha_1} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} + 1 \right) e^{\delta \sqrt{\frac{p}{\alpha}}} C_0 - \left(\frac{\lambda}{\alpha_1} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} - 1 \right) e^{-\delta \sqrt{\frac{p}{\alpha}}} C_1 = \frac{q(p)}{pc} + \theta_1(p) \quad (2.56)$$

Розв'язавши рівняння (2.55) та (2.56) відносно C_0 та C_1 отримаємо:

$$C_0 = \frac{\left(\theta_1(p) - \frac{q(p)}{pc} \right) \left(1 + \frac{\lambda}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right) - \left(\theta_0 - \frac{q(p)}{ppc} \right) - e^{\delta \sqrt{\frac{p}{\alpha}}} \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha_1} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right)}{\left(1 + \frac{\lambda}{\alpha_1} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right) e^{\delta \sqrt{\frac{p}{\alpha}}} \left(1 + \frac{\lambda}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right) - e^{-\delta \sqrt{\frac{p}{\alpha}}} \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right) \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha_1} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right)} \quad (2.57)$$

$$C_1 = \frac{\left(\theta_1(p) - \frac{q(p)}{pc} \right) e^{\delta \sqrt{\frac{p}{\alpha}}} \left(1 + \frac{\lambda}{\alpha_1} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right) - \left(\theta_1 - \frac{q(p)}{ppc} \right) - \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right)}{e^{\delta \sqrt{\frac{p}{\alpha}}} \left(1 + \frac{\lambda}{\alpha_1} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right) \left(1 + \frac{\lambda}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right) - e^{-\delta \sqrt{\frac{p}{\alpha}}} \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right) \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha_1} \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \right)} \quad (2.58)$$

Після підстановки констант інтегрування C_0 та C_1 у вираз (2.53) та деяких скорочень, отримаємо:

$$\begin{aligned}
\theta(x, p) = & \frac{q(p)}{ppc} + \\
& + \frac{\left(\theta_1(p) - \frac{q(p)}{ppc}\right) \left[\left(1 + \frac{\lambda}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{\alpha}}\right) e^{x\sqrt{\frac{p}{\alpha}}} - \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{\alpha}}\right) - \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{\alpha}}\right) e^{-x\sqrt{\frac{p}{\alpha}}}\right]}{e^{\delta\sqrt{\frac{p}{\alpha}}} \left(1 + \frac{\lambda}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{\alpha}}\right) \left(1 + \frac{\lambda}{\alpha_1} \sqrt{\frac{p}{\alpha}}\right) - e^{-\delta\sqrt{\frac{p}{\alpha}}} \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{\alpha}}\right) \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha_1} \sqrt{\frac{p}{\alpha}}\right)} + \\
& + \frac{\left(\theta_0(p) - \frac{q(p)}{ppc}\right) \left[\left(1 + \frac{\lambda}{\alpha_1} \sqrt{\frac{p}{\alpha}}\right) e^{(\delta-x)\sqrt{\frac{p}{\alpha}}} - \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha_1} \sqrt{\frac{p}{\alpha}}\right) - \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{\alpha}}\right) e^{-(\delta-x)\sqrt{\frac{p}{\alpha}}}\right]}{e^{\delta\sqrt{\frac{p}{\alpha}}} \left(1 + \frac{\lambda}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{\alpha}}\right) \left(1 + \frac{\lambda}{\alpha_1} \sqrt{\frac{p}{\alpha}}\right) - e^{-\delta\sqrt{\frac{p}{\alpha}}} \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{\alpha}}\right) \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha_1} \sqrt{\frac{p}{\alpha}}\right)}
\end{aligned} \tag{2.59}$$

Як бачимо, структура розв'язку (2.59) вказує на неперервність функції температури, що дає змогу обмежити кількість первинних перетворювачів по об'єму зерносушарки.

Вираз (2.59) зв'язує вихідну величину $\theta(x, p)$ з трьома вхідними $q(p)$, $\theta_0(p)$ та $\theta_1(p)$. Із цього виразу можна отримати три передаточні функції, передавальної функції для каналу “ $\theta_0(p) \rightarrow \theta(x, p)$ ”:

$$W(p) = \frac{\theta(x, p)}{\theta_0(p)} = \frac{(1 + b\beta P)e^{(1-\frac{x}{\delta})^P} - (1 - b\beta P)e^{-(1-\frac{x}{\delta})^P}}{(1 + bP)(1 + b\beta P)e^P - (1 - bP)(1 - b\beta P)e^{-P}}, \tag{2.60}$$

де

$$P = \delta \sqrt{\frac{p}{\alpha}}; \quad b = \frac{\lambda}{\alpha_0 \delta}; \quad \beta = \frac{\alpha_1}{\alpha_0}. \tag{2.61}$$

2.4. Дискретне подання рівнянь (2.45) динаміки процесів в сушарці

Для перетворення рівняння (2.45) динаміки об'єкта, представленого в аналоговій (неперервній) формі, до дискретного вигляду, що дозволяє здійснити чисельне розв'язування його на ЕОМ, необхідно виконати дискретизацію

незалежних змінних, вхідних та вихідних функцій, їх похідних та самого рівняння динаміки [83]. Незалежними змінними в диференціальних рівняннях динаміки в частинних похідних, звичайно, є час t та одна або декілька просторових координат, наприклад, координата X . Дискретизацію рівняння динаміки починають з дискретизації незалежних змінних t та X . Якщо крок дискретизації для часу $\Delta t = \tau$ і для просторової координати $\Delta x = h$. Поточне значення часу можна виразити:

$$t = v\tau, \quad (2.64)$$

де v – відповідний номер кроку τ з часу, $v = 1, 2, \dots$

Значення просторової координати X :

$$X = S h, \quad (2.65)$$

де S – номер кроку h вздовж координати X , $S = 1, 2, \dots$

Якщо в рівнянні динаміки є вхідна функція температури зерна $\theta^1(t)$, вихідна функція $\theta(x, t)$, а також перша та друга частинні похідні вихідної функції $\frac{d\theta(x, t)}{dt}$ та $\frac{d^2\theta(x, t)}{dx^2}$, то необхідно мати їх дискретне наближення. Дискретним поданням функції температури зерна $\theta^1(t)$ з врахуванням (2.64) буде:

$$\theta^1(t)|_{t=v\tau} \cong \theta_v^1. \quad (2.66)$$

Вихідна змінна в дискретній формі:

$$\theta(x, t)|_{\substack{x=sh \\ t=v\tau}} \cong \theta_{s,v}. \quad (2.67)$$

Першу частинну похідну з часу вихідної функції $\theta(x, t)$ виразимо скінченною різницею (вперед):

$$\frac{d\theta(x, t)}{dt} \cong \frac{\theta_{s,v+1} - \theta_{s,v}}{\tau} = \Delta_{\tau}^+. \quad (2.68)$$

Дискретний вираз другої частинної похідної вихідної функції з просторової координати X буде мати вигляд:

$$\frac{d^2\theta(x,t)}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{d\theta(x,t)}{dx} \right) \cong \frac{\Delta_x^+ - \Delta_x^-}{h}, \quad (2.69)$$

де Δ_x^+ – перша різниця вперед,

$$\Delta_x^+ = \frac{\theta_{s+1,v} - \theta_{s,v}}{h}.$$

Δ_x^- – перша різниця назад,

$$\Delta_x^- = \frac{\theta_{s,v} - \theta_{s-1,v}}{h}.$$

З врахуванням наведеного вище, представимо другу похідну (2.69):

$$\frac{d^2\theta(x,t)}{dx^2} = \frac{\theta_{s+1,v} - 2\theta_{s,v} + \theta_{s-1,v}}{h^2}. \quad (2.70)$$

Перетворення до дискретної форми динамічної моделі, яка складається із рівняння динаміки:

$$\alpha \frac{d^2\theta(x,t)}{dx^2} = \frac{d\theta(x,t)}{dx}, \quad (2.71)$$

граничної умови

$$-\lambda \frac{d\theta(x,t)}{dx} \Big|_{x=0} = \alpha [\theta^1(t) - \theta(x,t)|_{x=0}] \quad (2.72)$$

та початкової умови

$$\theta(x,t)|_{t=0} = \theta^0(x). \quad (2.73)$$

Підставимо в рівняння динаміки (2.70) вирази (2.68) та (2.69):

$$\alpha \frac{\theta_{s+1,v} - 2\theta_{s,v} + \theta_{s-1,v}}{h^2} = \frac{\theta_{s,v+1} - \theta_{s,v}}{\tau}.$$

Визначимо із нього значення вихідної функції $\theta_{s,v}$ на наступному кроці з часу $\theta_{s,v+1}$:

$$\theta_{s,v+1} = \frac{\alpha\tau}{h^2} (\theta_{s+1,v} + \theta_{s-1,v}) - \left(2\frac{\alpha\tau}{h^2} - 1\right) \theta_{s,v}. \quad (2.74)$$

Для граничної умови (2.72) шляхом підстановки (2.66), (2.67) та значення похідної $\frac{d\theta(x,t)}{dx}$, отримаємо:

$$-\lambda \frac{\theta_{s+1,v} - \theta_{s,v}}{h} \Big|_{s=0} = \alpha (\theta_v^1 - \theta_{s,v} \Big|_{s=0})$$

або

$$-\frac{\lambda}{\alpha h} (\theta_{1,v} - \theta_{0,v}) = \theta_v^1 - \theta_{0,v},$$

звідки

$$\theta_{0,v} = \frac{\frac{\lambda}{\alpha h} \theta_{1,v} - \theta_v^1}{\frac{\lambda}{\alpha h} + 1}. \quad (2.75)$$

Початкова умова вихідної функції (2.73):

$$\theta(x,t) \Big|_{t=0} = \theta_{s,v} \Big|_{v=0} = \theta_{s,0}. \quad (2.76)$$

Вирази (2.74), (2.75) та (2.76) представляють дискретну математичну модель динамічної моделі сушарки, як об'єкта з розподіленими параметрами.

Під час дискретного представлення неперервної функціональної залежності, в тому числі і рівняння динаміки об'єкта з розподіленими параметрами, виникає питання про величину кроків зміни незалежних змінних, наприклад τ та h ((2.64) та (2.65)). Величина кроку дискретизації неперервних змінних як залежних, так і незалежних суттєво впливає на процес дискретного моделювання неперервних функцій та рівнянь. Існує максимально допустимий для відповідної функції крок дискретизації незалежних змінних t та x . Якщо крок дискретизації буде більшим допустимого, то отримувана дискретна функція не буде відображати початкову аналогову. З іншого боку, моделювання на ЕОМ об'єктів з розподіленими параметрами забирає значний час, у зв'язку з тим, що моделі таких об'єктів мають

як мінімум дві незалежні змінні t та x , і для визначення значень вихідної величини, наприклад $\theta(x, t)$, доводиться робити кроки вздовж просторової змінної x , а потім – t , тобто в розрахунках проводити покриття певної площини з координатами x, t . У зв'язку з чим малий крок із змінних x та t різко збільшує час обчислення. Для визначення кроку дискретизації (квантування) з незалежних змінних існує ряд методик [2, 4, 8]. Однак для їх використання необхідна інформація про об'єкт.

2.5. Моделювання процесу теплообміну через елементарний шар зерна

Розглянута вище методика отримання, дослідження та перетворення математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами показала громіздкість отримуваних залежностей, а також значну складність їх застосування. В зв'язку з чим, математичні моделі об'єктів з просторовим розподілення параметрів використовувались досить рідко. Їх стараються замінити моделями із зосередженими параметрами, що, звичайно, зменшує точність математичних моделей і нерідко приводить до неадекватності отримуваних моделей об'єктам моделювання. Моделювання таких об'єктів на ЕОМ в значній мірі зменшує складність врахування просторового розподілення параметрів, що робить можливим використання моделей з розподіленими параметрами в інженерних розрахунках. На програму ЕОМ доцільно покласти обчислення коефіцієнтів і розв'язування отримуваних моделей. З такої цифрової моделі, якщо у тому є необхідність, можна виводити коефіцієнти моделі та результати розрахунків. Моделювання об'єктів з розподіленими параметрами зв'язано з вибором певних просторових координат, в яких найбільш зручно представити розподілення параметрів у просторі. Використання такої системи (декартової) координат визначає підхід до моделювання об'єктів, а також структуру моделі. Розглянемо цю методику на прикладах теплообміну через шар зерна.

Припустимо, що шар зерна у сушарці є однорідний теплопровідний шар товщиною δ , з коефіцієнтом теплопровідності λ температура якого змінюється лише по товщині вздовж просторової координати x та в часі t [88,89]. Тобто маємо одномірний нестационарний тепловий потік, що визначається температурою $\theta(x,t)$. Такий шар омивається середовищами, які мають з одного боку температуру $\theta_0(t)$, а з другого – $\theta_1(t)$. Теплообмін шару зерна з середовищами, що її омивають, – конвективний, у зв'язку з чим, як граничні умови процесу теплопередачі ми можемо представити граничні умови 3-го роду:

$$-\lambda \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_0 [\theta_0(t) - \theta(x,t)|_{x=0}]; \quad (2.77)$$

$$-\lambda \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \alpha_1 [\theta(x,t)|_{x=\delta} - \theta_1(t)], \quad (2.78)$$

де α_0 та α_1 – коефіцієнти тепловіддачі відповідно від одного середовища до шару зерна та від шару до іншого середовища, що його омиває.

Виділимо всередині шару, що розглядається, на відстані x від однієї поверхні нескінченно тонкий шар товщиною dx , розташований перпендикулярно тепловому потоку з однаковою температурою $\theta(x,t)$. Цей шар можна розглядати як акумулюючу ємкість. Ця акумулююча ємкість буде нескінченно тонкою, товщиною dx . Рівняння теплового балансу у динаміці для цієї акумулюючої ємкості:

$$Q_x - Q_{x+dx} = Q_a, \quad (2.79)$$

де Q_x – тепловий потік вздовж координати X , що входить в цю акумулюючу ємкість шару,

$$Q_x = -\lambda \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial x} F, \quad (2.80)$$

де F – площа теплообмінного шару з температурою $\theta(x,t)$;

Q_{x+dx} – тепловий потік, що виходить із нескінченно малої акумулюючої ємкості, тобто із виділеного шару,

$$Q_{x+dx} = Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx, \quad (2.81)$$

де $\frac{\partial Q_x}{\partial x}$ – градієнт зміни теплового потоку Q_x вздовж координати x .

Визначимо його, підставляючи значення Q_x із (2.80):

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial x} F \right) = -\lambda \frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial x^2} F, \quad (2.82)$$

Q_a – теплота, що акумулюється в акумулюючій ємкості під час зміни її температури,

$$Q_a = F dx \rho c \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t}, \quad (2.83)$$

де ρ та c – відповідно щільність та теплоємність шару зерна.

Підставимо складові (2.81), (2.82) та (2.83) в рівняння динаміки (2.79):

$$Q_x - \left[Q_x + \left(-\lambda \frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial x^2} F dx \right) \right] = F dx \rho c \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t}, \quad (2.84)$$

яке після скорочень буде мати вигляд:

$$\frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial x^2}, \quad (2.85)$$

де a – коефіцієнт теплопровідності,

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (2.86)$$

Рівняння (2.85) разом з граничними умовами (2.77) та (2.78) буде динамічною моделлю процесу теплопередачі через шар зерна. Щоб цей процес був повністю заданим, потрібно ще початкове значення температури $\theta(x,t)$,

$$\theta(x,t)|_{t=0} = \theta^0(x). \quad (2.87)$$

Отриману динамічну модель процесу теплопередачі перетворимо в алгоритм для розв'язання на ЕОМ. Для цього рівняння динаміки (2.85) акумулюючої ємкості, граничні (2.77), (2.78) та початкові (2.87) умови приведемо до дискретної форми.

Почнемо перетворення із незалежних змінних, яких у розглянутій динамічній моделі є дві – x та t . Задамо їх у вигляді дискретних функцій (2.64), (2.65).

Враховуючи товщину стінки δ крок дискретизації h можна виразити:

$$h = \frac{\delta}{n}, \quad (2.88)$$

де n – число шарів, на яке розбито шар зерна за товщиною.

Неперервну функцію $\theta(x, t)$, з врахуванням та (2.88), можна подати у вигляді дискретної:

$$\theta(x, t)|_{\substack{x=sh \\ t=v\tau}} = \theta_{s,v}. \quad (2.89)$$

Перетворимо до дискретного вигляду похідні вихідної функції (2.85) та (2.77):

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} \cong \frac{\theta_{s,v+1} - \theta_{s,v}}{\tau}, \quad (2.90)$$

$$\frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} \cong \frac{\theta_{s-1,v} - 2\theta_{s,v} + \theta_{s+1,v}}{h^2}. \quad (2.91)$$

Підставимо вирази (2.90) та (2.91) у рівняння (2.85)

$$\frac{\theta_{s,v+1} - \theta_{s,v}}{\tau} = a \frac{\theta_{s-1,v} - 2\theta_{s,v} + \theta_{s+1,v}}{h^2}. \quad (2.92)$$

Розв'яжемо рівняння (2.92) відносно $\theta_{s,v+1}$:

$$\theta_{s,v+1} = q_1 \theta_{s,v} + q(\theta_{s-1,v} + \theta_{s+1,v}); \quad (2.93)$$

де $1 \leq s \leq n - 1$,

$$q = \frac{a\tau}{h^2}, \quad (2.94)$$

$$q_1 = 1 - q. \quad (2.95)$$

Найвища точність апроксимації диференціального рівняння (2.85) різницеvim рівнянням (2.93) має місце, якщо $q \geq 1/6$ [6]. Стійкість розв'язування

рівняння (2.93) досягається, за умови $q \leq 1/2$. Перетворимо до дискретної форми вхідні змінні: $\theta_0(t)|_{t=v\tau} = \theta_v^0$, $\theta_1(t)|_{t=v\tau} = \theta_v^1$. З врахуванням цього, а також (2.89) та (2.90) перетворимо до дискретної форми рівняння граничних та початкових умов:

$$-\lambda \frac{\theta_{s+1,v} - \theta_{s,v}}{h} \Big|_{s=0} = \alpha_0 \left(\theta_v^0 - \theta_{s,v} \Big|_{s=0} \right),$$

звідки

$$\theta_{0,v} = C_1 \theta_{1,v} + C_2 \theta_v^0, \quad (2.96)$$

де

$$C_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \alpha_0 h}; C_2 = 1 - C_1; \theta_v^0 = \theta_0(t) \quad (2.97)$$

Гранична умова (2.78) в дискретній формі буде мати вигляд:

$$-\lambda \frac{\theta_{n,v} - \theta_{n-1,v}}{h} = \alpha_1 (\theta_{n,v} - \theta_v^1), \quad (2.98)$$

звідки

$$\theta_{n,v} = b_1 \theta_{n-1,v} + b_2 \theta_v^1, \quad (2.99)$$

де

$$b_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \alpha_1 h}; b_2 = 1 - b_1; \theta_v^1 \cong \theta_1(t). \quad (2.100)$$

Початкова умова (2.87) у дискретній формі:

$$\theta^0(x) = \theta(x, t)|_{t=0} = \theta_{s,v} \Big|_{v=0} = \theta_{s,0}. \quad (2.101)$$

Рівняння (2.93), (2.96), (2.99) та (2.101) будуть алгоритмом дискретного моделювання динаміки теплового потоку через шар зерна. Для програмування розв'язування цієї моделі на ЕОМ доцільно утворити цикл, в якому будуть використані рівняння алгоритму. Розрахунок коефіцієнтів цієї дискретної моделі (2.86), (2.93), (2.95), (2.97), (2.100) потрібно виконати до згаданого циклу.

Розрахунок часових характеристик об'єктів з розподіленими параметрами, як і розв'язування інших диференціальних рівнянь проводиться шляхом створення циклу. Для створення циклу розрахунку зміни температури зерна $\theta_{s,v}$ у динаміці необхідно мати значення температури в розрахунковий момент часу $\theta_{s,v+1}$ та на попередньому кроці $\theta_{s,v}$ для цього використовуються масиви температур $\theta_{s,v+1}$ та $\theta_{s,v}$, тобто зміну температури по товщині шару зерна.

Висновки за розділом

Виходячи з фізичних основ процесу сушки (Розділ 1) та структури математичної моделі з розподіленими параметрами (2.23), (2.24) та гладкості (лінійності (2.35), (2.36)) просторового розподілу температури (і, відповідно, вологості) зернової маси, а також аперіодичності (2.68) динаміки, з метою спрощення побудови САК процесом, доцільно перейти від системи з розподіленими до системи з зосередженими параметрами, представивши її матричною передаточною функцією зв'язку i -х вхідних з j -ми вихідними змінними, які вимірюються у відповідних точках агрегату обмеженою кількістю первинних перетворювачів температури і вологості.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА АДАПТИВНОЇ ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АВТОНОМНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СУШКИ ЗЕРНА

3.1 Аналіз існуючих зерносушарок як об'єкта керування

Зерносушарки мають забезпечувати повне зберігання або поліпшення якості зерна, а отже, рівномірне нагрівання та сушіння його; одночасне сушіння зерна різної вологості; висушування зерна будь-якої початкової вологості до кінцевої за одне проходження; сушіння зерна без його попереднього очищення; неперервне приймання зерна, тобто його сушіння в потоці надходження зерна; виключення виносу та механічного пошкодження зерна; ефективне охолодження зерна; порівняно низькі витрати палива, електроенергії, капітальні вкладення. Зерносушарки мають бути універсальними, екологічно безпечними, пожежобезпечними, простими в обслуговуванні та автоматично регульованими [2, 3, 7, 40]. За способом підведення теплоти розрізняють конвективні та кондуктивні зерносушарки. За станом зернового шару розрізняють сушарки зі щільним нерухомим, гравітаційно рухомим, псевдорозрідженим, падаючим і зваженим шарами.

За конструкцією сушильної камери розрізняють шахтні, барабанні, камерні, трубні та інші. Вони складаються з однієї або кількох сушильних камер однакової конструкції, що працюють паралельно або послідовно. Велику групу складають зерносушарки, які мають камери різної конструкції з різним станом зернового шару. Такими є сушарки з попереднім нагріванням і рециркуляцією зерна, до складу яких входять, наприклад, пневмотруба та шахта, камера з падаючим шаром зерна та шахта, камера з псевдорозрідженим шаром і шахта.

Найпоширеніша конструкція зерносушильної камери – це шахта прямокутного перерізу, всередині якої розміщують короби, через які підводять свіжий і відводять відпрацьований агент сушіння [3, 7]. Іншим видом сушильної камери шахтного типу є камера з падаючим шаром зерна. Для його механічного гальмування всередині такої камери розміщують стержні або гірлянди конусів чи куль. У барабанних зерносушарках сушильна камера – це барабан, що обертається і всередині якого міститься насадка у вигляді лопатей, які розпушують та пересипають зерно під час його руху вздовж барабана. Камерна сушарка – це прямокутна камера з похилим або горизонтальним сітчастим днищем.

За *режимом роботи* розрізняють зерносушарки періодичної та неперервної дії. У неперервно діючих зерно рухається від місця завантаження до місця його випускання під дією гравітаційних сил. Перевагами таких сушарок є повніше використання сушильної камери, оскільки практично виключаються простої їх під час завантаження та розвантаження зерна, кращі умови для контролю та автоматизації процесу його сушіння, можливість застосування в потокових технологічних лініях. За *принципом дії* розрізняють *прямоточні* та *рециркуляційні* зерносушарки. За *конструктивним виконанням* *стаціонарні* та *пересувні* зерносушарки.

3.1.1 Шахтні прямоточні зерносушарки

Шахтні прямоточні є сушарками неперервної дії. У сушильній шахті під дією сил тяжіння зерно рухається зверху вниз і пронизується агентом сушіння. Зерно переміщується в шахті суцільною масою зі швидкістю, що визначається роботою випускного механізму періодичної або неперервної дії [2, 3, 7]. Найпоширенішими є конвективні зерносушарки стаціонарні (ДСП–16, ДСП–24, ДСП–32, ДСП–32от) та пересувні (ЗСПЖ–8, К4–УСА, К4–УС2–А). Схеми шахтних прямоточних зерносушарок зображено на рис. 3.1 і 3.2, де показано умовно рух зерна та агента сушіння.

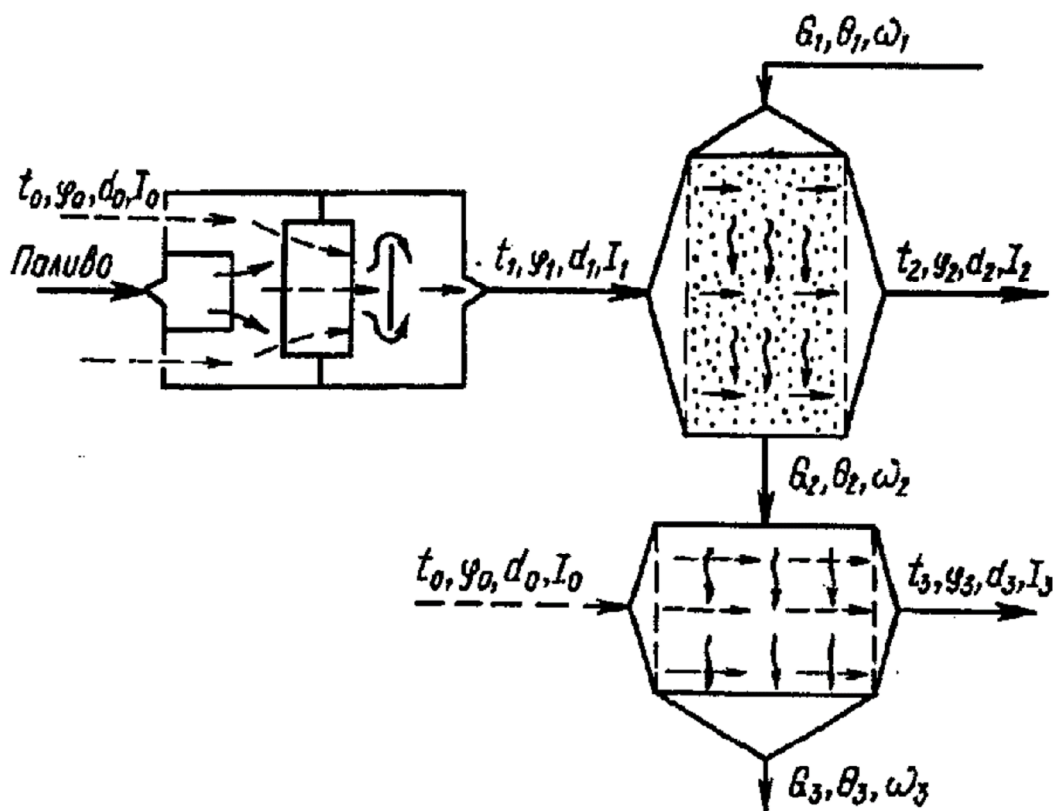


Рис. 3.1. Схема шахтної прямої зерносушарки з топкою – калорифером змішування: G – подача зерна, т/год; θ – його температура, $^{\circ}\text{C}$; ω – вологість зерна, %; t – температура агента сушіння, $^{\circ}\text{C}$; φ – його відносна вологість, %; d – вологовміст, г пари/кг с.п.;

I – питома ентальпія, кДж/кг с.п.

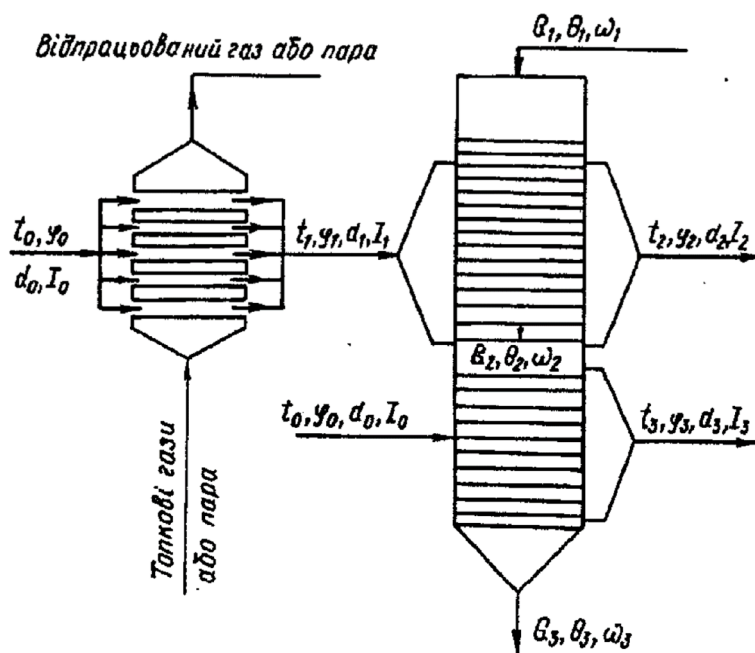


Рис. 3.2. Схема шахтної прямої зерносушарки з топкою – поверхневим калорифером (позначення величин ті самі, що й на рис. 3.1)

Шахтна прямоточна зерносушарка складається з сушильних та охолоджувальних шахт з коробами, вентиляційного устаткування, напірно-розподільної камери, випускних механізмів, над- і підсушильних бункерів. Усередині них встановлено коробки рядами в шаховому порядку, між коробами знаходиться зерно. Агент сушіння надходить із напірно-розподільної камери у підвідні коробки, проходить шар зерна і виходить з протилежного боку шахти через відвідні коробки [3, 7]. Стінки шахт із сталі або залізобетону. За відсутності коробів як розподільних пристроїв сталі стінки роблять перфорованими (жалюзійними). У таких сушарках товщина зернового шару, що продувається агентом сушіння, визначається відстанню між стінками і лежить у межах 200...500 мм. Товщина зернового шару, який продувається агентом сушіння, у шахтах з коробами залежить від відстані між підвідними та відвідними коробами й становить 100...200 мм. Короб – це канал з відкритим нижнім боком, через який агент сушіння входить у зерновий шар або виходить із нього. Під нижнім відкритим боком коробка зерно розміщується під кутом природного укусу. Для більш інтенсивного продування зернового шару стінки коробів іноді роблять жалюзійними. Один із торцевих боків коробка відкритий, інший – заглушений. Підвідні коробки відкриті у бік напірно-розподільної камери, звідки надходить агент сушіння, а заглушені з протилежного боку. Відвідні коробки закриті з боку напірно-розподільної камери, а відкриті з протилежного боку, де агент сушіння виходить із шахти. Короби виготовляють з листової сталі завтовшки 1,5...2 мм. Стінки відвідних коробів з внутрішнього боку покривають антикорозійним лаком. Короби є п'ятигранної форми, тригранні, багатогранні. Для кращого пересування зерна по поверхні коробка кут між його верхніми гранями не повинен перевищувати 70° . Радіус заокруглення верхнього ребра коробка роблять не більшим від 5 мм для запобігання затриманню зерна та накопиченню домішок на коробі. Короби п'ятигранної форми мають ширину 100 мм, висоту 125...232 мм. Розташування та форми повітророзподільних коробів шахтних прямоточних зерносушарок різних типів показано на рис. 3.3.

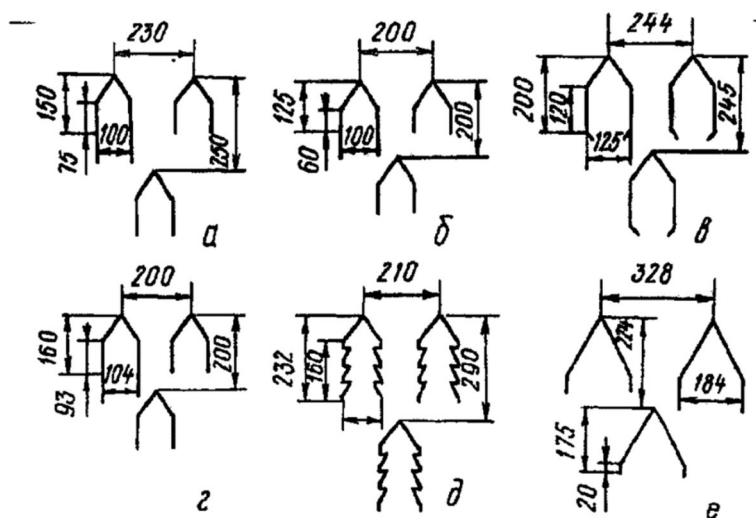


Рис. 3.3. Розташування та форми повітророзподільних коробів шахтних прямоточних зерносушарок різних типів: *a* – ВТІ; *б* – ДСП; *в* – СЗШ-16; *г* – СЗС-8; *д* – ЗСПЖ-8, К4-УСА; *е* – СЗШ-16М.

Кількість коробів у шахті визначають, виходячи із швидкості відпрацьованого агента сушіння на виході з відповідних коробів, яка обмежена можливістю винесення зерна з них і не повинна перевищувати 6 м/с. Підвідні та відвідні короби чергуються між собою [7, 40].

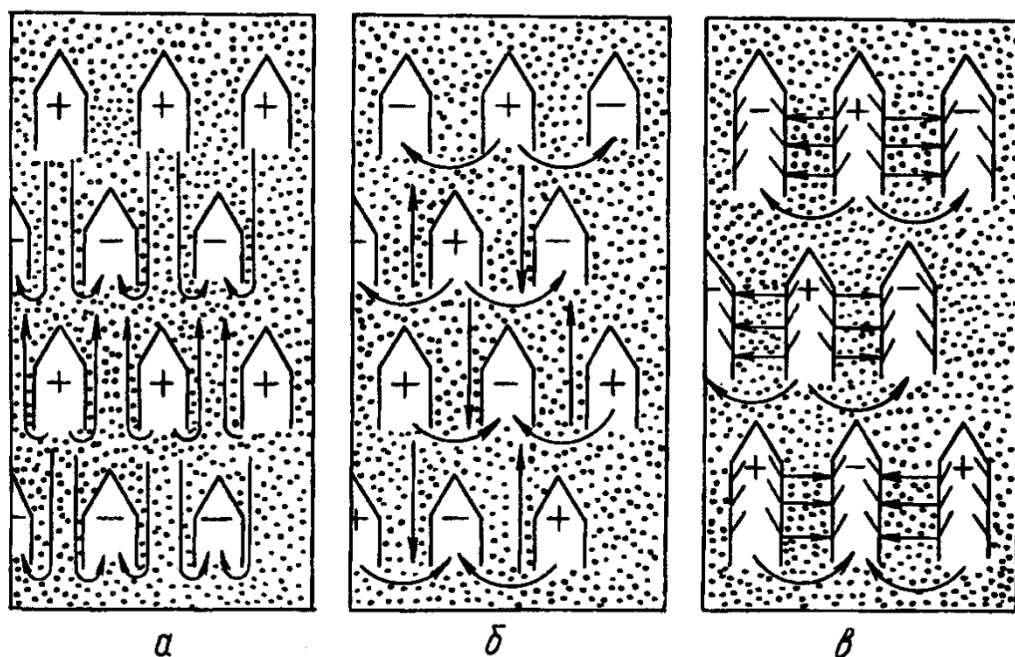


Рис. 3.4. Розміщення підвідних і відвідних коробів у шахті прямоточних зерносушарок: *a* – в різних рядах; *б, в* – через один у кожному ряду

На рис. 3.4, *a* зображено вертикальний напрямок руху агента сушіння, а на рис. 3.4, *б, в* – горизонтальний. При горизонтальному напрямку руху агента

товщина шару, що продувається, вдвічі менша, ніж при вертикальному. Розміщення коробів у шаховому порядку сприяє кращому перемішуванню зерна. Біля стінок шахти розташовують напівкороби, які виготовляють відвідними для запобігання перегріванню зерна. Стальні короби мають високий коефіцієнт теплопровідності, тому теплота агента сушіння швидко передається через стінки коробів зерну, яке торкається коробів і може перегріватися, що призводить до погіршення його якості. Це спостерігається при тривалому сушінні зерна.

Під час виготовлення зерносушарок К4–УСА, К4–УС2–А, СЗС–8, СЗП–16 з відносно невеликою висотою шахти (до 5 м) зі стальними стінками 1 короби 2 встановлюють через верх шахти кінцями на опори 3, що мають форму поперечного перерізу короба та приварені до стінок шахти (рис. 3.5, а). До кінців коробів приварюють жорсткі фіксатори 4 у вигляді смужки, за допомогою яких короб притискається до опор і забезпечується його кріплення. Напівкороби кріплять до стінок шахти у процесі її виготовлення.

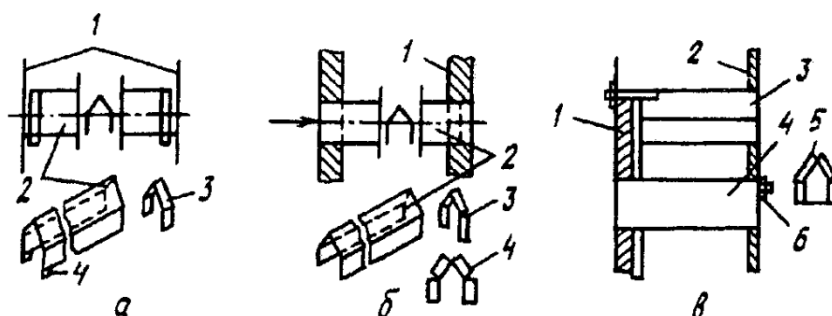


Рис. 3.5. Установлення коробів у шахті прямоточних зерносушарок: а – СЗС–8, К4–УСЛ; б – ВТІ, ДСП (1 – залізобетонна стінка шахти; 2 – короб; 3, 4 – елемента кріплення короба); в – ДСП–32от (1 – теплоізоляція; 2 – стінка шахти; 3 – підвідний короб; 4 – відвідний короб; 5 – відбортування короба; 6 – шпилька для його кріплення)

Короби вставляють у шахту через отвори у стінках так, аби відбортовані стінки прилягали до стінки шахти, а шпильки, що знаходяться на іншому боці коробів, проходили крізь отвори у протилежній стінці шахти та закріплювалися гайками. Для забезпечення рівномірного виходу зерна із шахтних прямоточних сушарок та регулювання їх продуктивності під охолоджувальними шахтами встановлюють випускні механізми.

3.1.2 Зерносушарки типу ДСП

Зерносушарки ДСП–32от. відкритого типу застосовують на хлібоприймальних підприємствах і встановлюють на поточних лініях для приймання, очищення, сушіння та відвантаження зерна, а також безпосередньо біля елеваторів і складів [2, 3, 7]. Зерносушарка ДСП–32от (рис. 3.6) найпоширеніша в нашій країні завдяки компактності, надійності, низькій вартості, можливості сушіння всіх зернових культур. Топку розміщують в окремій споруді, розташованій поруч.

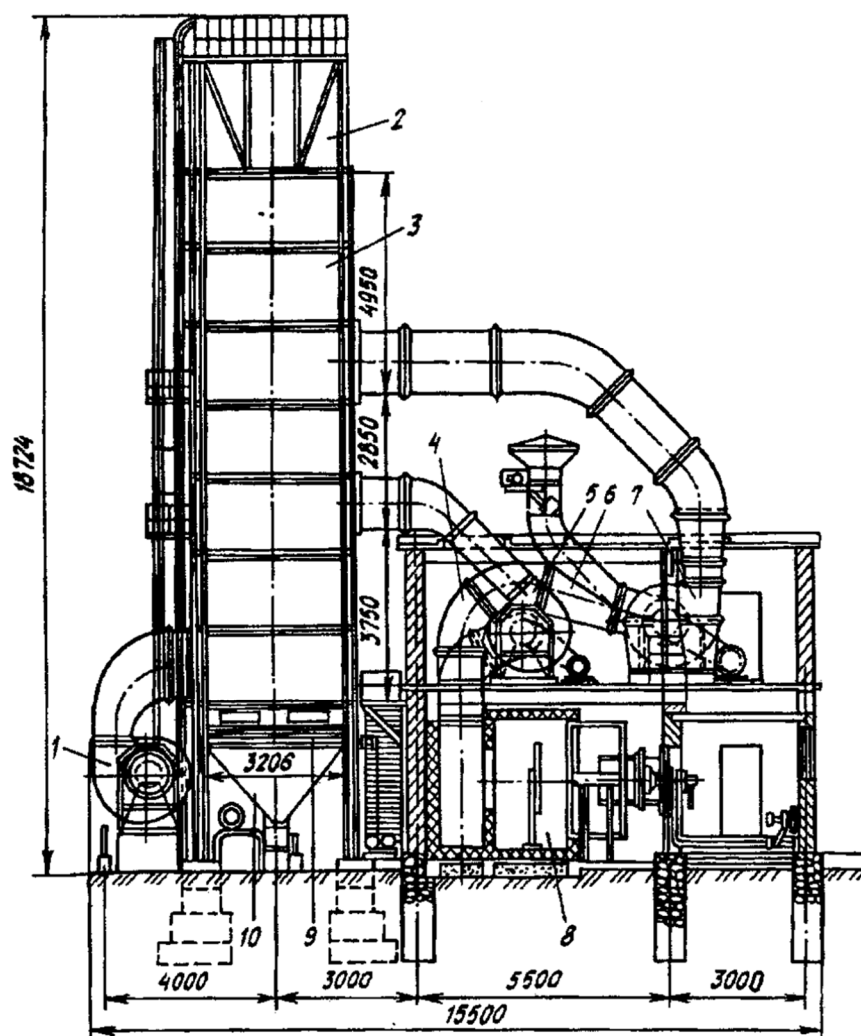


Рис. 3.6. Зерносушарка ДСП–32от: 1 – вентилятор охолоджувальної зони; 2 – надсушильний бункер; 3 – сушильні шахти; 4 – всмоктувальний повітропровід вентилятора другої зони; 5 – вентилятор другої зони; 6 – всмоктувальний повітропровід вентилятора першої зони; 7 – вентилятор першої зони; 8 – топка; 9 – випускний механізм; 10 – підсушильний бункер

Зерносушарка є установкою відкритого типу з двоступінчастим режимом сушіння і складається з двох паралельно працюючих шахт заввишки 11571 мм. Кожна шахта має сім секцій і по висоті поділяється на три зони: перша зона (заввишки 4950 мм) розташована у верхній частині шахти, друга (заввишки 2850 мм) – у середній, а третя (зона охолодження) – в нижній частині шахти. Висота секції 1650 мм. У кожній секції є вісім рядів коробів по 16 штук у кожному ряду. Отже, враховуючи переваги таких зерносушарок, доцільно саме на їх основі розробити новий зразок сушарок, що задовольнятиме вимогам якості до просушеного зерна та ефективно використовуватиме енергоносії.

3.2 Розробка конструкції дослідного зразка мінісушарки

За основу створення дослідного зразка взята сушильна секція зерносушарки ДСП–32от в масштабі 1:4. Дослідний зразок складається з сушильної камери (об'єкт керування) розміром 485x720x300 мм до якої входить 50 коробів та 8 напівкоробів (з них 30 підвідних коробів, 20 коробів та 8 напівкоробів відвідних (рис. 3.7, рис. 3.8), дифузора (рис. 3.8), нагрівального елемента (виконавчий пристрій SEN 50–25/22,5) (рис. 3.9) та підвідного повітропроводу з вентилятором (виконавчий пристрій).

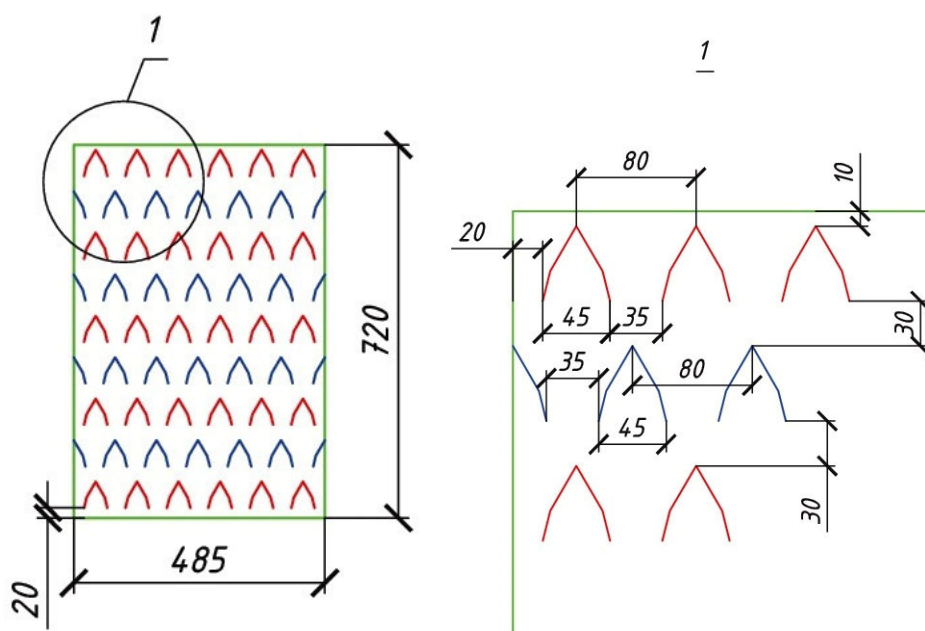


Рис. 3.7. Розріз сушильної камери зразка

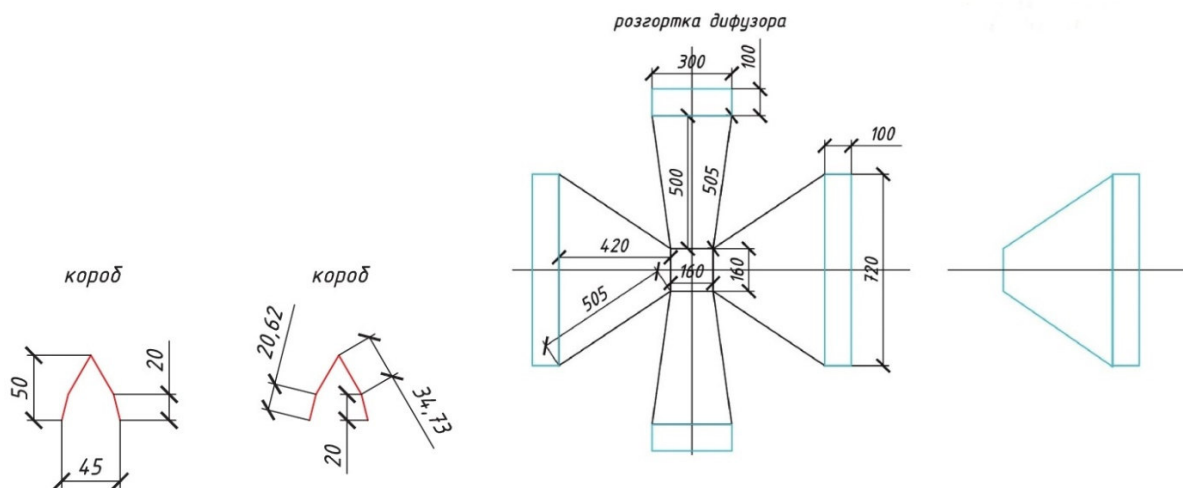


Рис. 3.8. Розріз короба зразка та креслення дифузора



Рис. 3.9. Нагрівач

Вимірювальна система складається з цифрових датчиків вологості та температури (змонтованих на одній платі (HTU21D)) (рис. 3.10а), контролера Arduino (рис. 3.11б) та персонального комп'ютера.

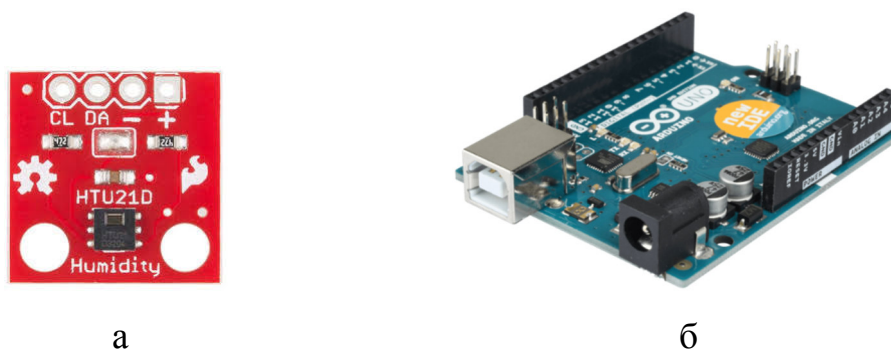


Рис. 3.10. Датчик температури і вологості та контролер

Фізична модель зерносушарки (рис. 3.12) зібрана на основі лабораторного стенда, що забезпечує подачу сушильного агента (повітря) до сушильної камери по трьох фіксованих положеннях (витрата складає $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$, $0,23 \text{ м}^3/\text{с}$ та $0,241 \text{ м}^3/\text{с}$). Виходячи з підвідного повітропроводу сушильний агент потрапляє до нагрівального пристрою (виконавчий механізм – електронагрівач SEN 50–25/22,5), що працює у двох положеннях потужності: $2,5 \text{ кВт}$ та 5 кВт , у третьому положенні нагрівач вимкнено. Далі підігрітий сушильний агент через дифузор надходить до сушильної камери, де проходячи через шар зерна віддає частину власної температури та забирає частину вологості зерна.





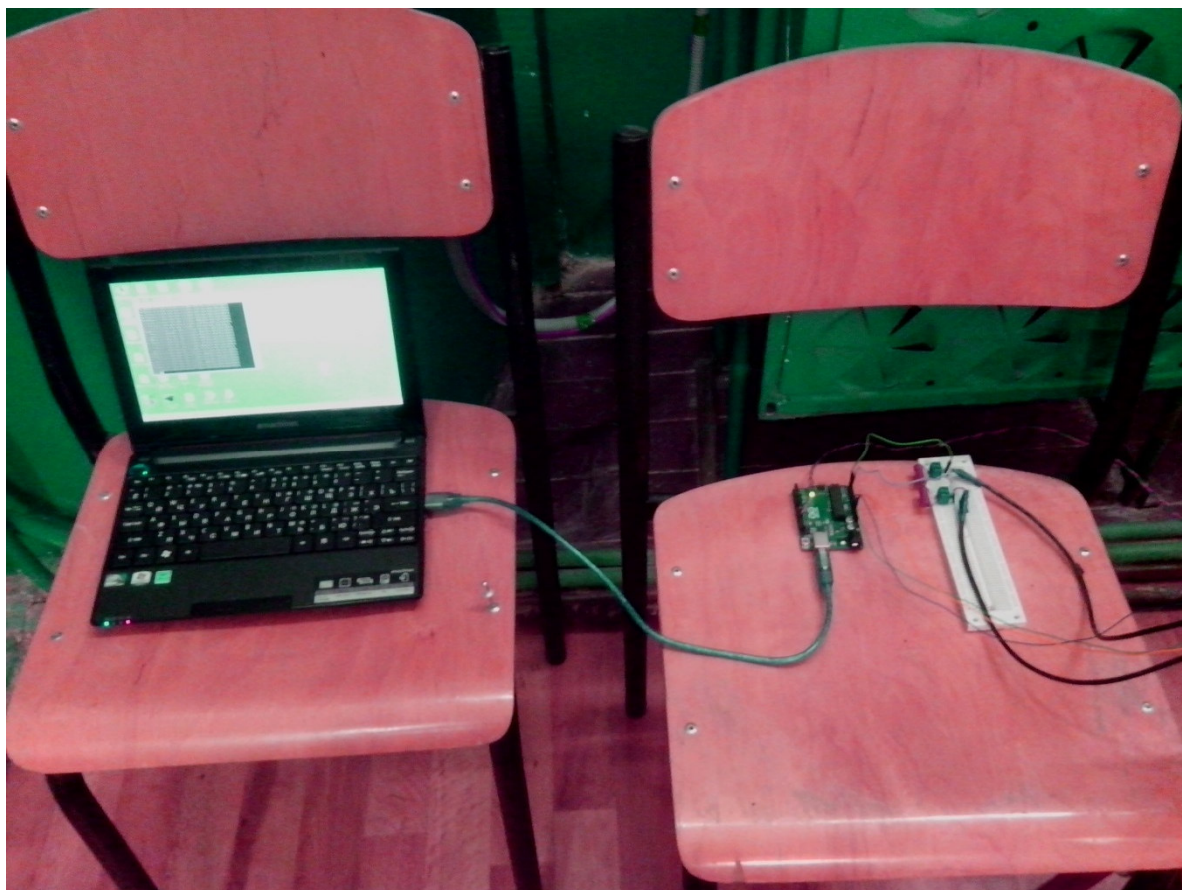


Рис. 3.11. Дослідний зразок зерносушарки

3.3 Теоретико–експериментальний підхід до побудови моделі САК зерносушаркою

3.3.1 Математичні моделі багатомірних САК

В системі автоматичного управління зерносушаркою керованими змінними є температура сушильного агента та його об'єм, що подається в сушильну камеру; температура зерна та його вологість; керуючими – потужність нагрівача та витрати сушильного агента. Для управління кожною з змінних конструюється свій канал [123]. Таку систему можна представити структурною схемою (рис. 3.13). На схемі $Y(t)$ – векторний вхідний сигнал (“уставка” САК). В нашому випадку

$$Y(t) = (y_1(t)y_2(t))$$

де, $y_1(t)$ – задане (необхідне) значення вологості зерна,

$y_2(t)$ – задане (необхідне) значення температури зерна,

$X(t) = (x_1^B(t), x_2^B(t))$ – векторний вихідний сигнал,

$x_1^B(t)$ – реальне значення вологості зерна,

$x_2^B(t)$ – реальне значення температури зерна.

Структурну схему двомірної системи управління секцією зерносушарки зображено на рис. 3.13. В добре спроектованій системі канали $y_1(t) \rightarrow x_1^B(t)$ та $y_2(t) \rightarrow x_2^B(t)$ – незалежні, тобто вихід $x_1^B(t)$ управляється тільки сигналом $y_1(t)$ і $x_2^B(t)$ – сигналом $y_2(t)$ (сигнал $y_1(t)$ не впливає на $x_2^B(t)$ і $y_2(t)$ не впливає на $x_1^B(t)$) [92, 93].

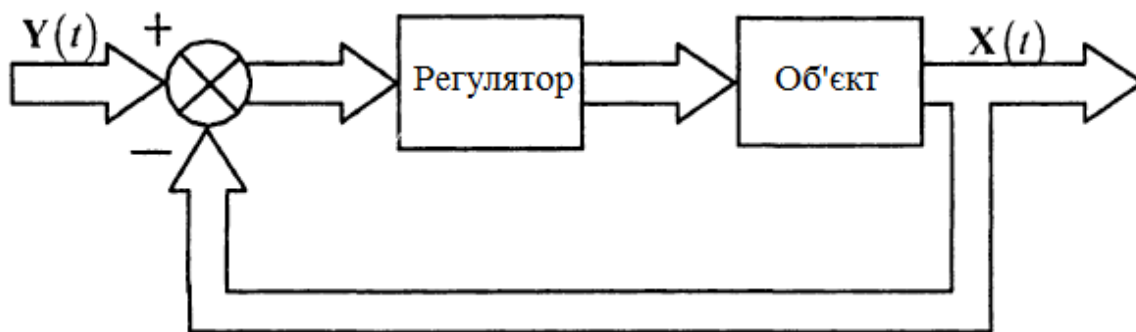


Рис. 3.12 Структурна схема управління зерносушаркою

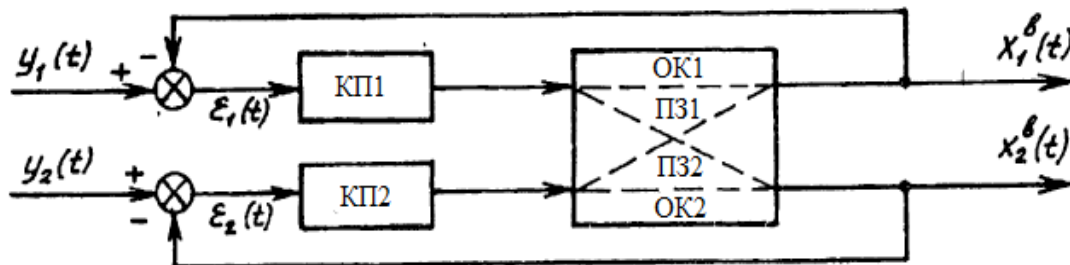


Рис.3.13 Структурна схема двомірної системи управління зерносушаркою

Однак, поряд з основними каналами ОК1 і ОК2 мають місце перехресні зв'язки ПЗ1 (сигнал $y_1(t)$ впливає на вихід $x_2^B(t)$) і ПЗ2 (сигнал $y_2(t)$ впливає на вихід $x_1^B(t)$).

В загальному випадку для m входів і p виходів маємо систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} L_{11}x_1^B + \dots + L_{1p}x_p^B &= \tilde{L}_{11}y_1 + \dots + \tilde{L}_{1m}y_m; \\ L_{21}x_1^B + \dots + L_{2p}x_p^B &= \tilde{L}_{21}y_1 + \dots + \tilde{L}_{2m}y_m; \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$L_{p1}x_1^B + \dots + L_{pp}x_p^B = \tilde{L}_{p1}y_1 + \dots + \tilde{L}_{pm}y_m,$$

де L_{ij}, \tilde{L}_{ij} – лінійні диференціальні оператори:

$$L_{ij} = a_n^{ij} \frac{d^n}{dt^n} + a_{n-1}^{ij} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + a_0^{ij}, \quad i, j = \overline{1, p};$$

$$\tilde{L}_{ij} = b_n^{ij} \frac{d^r}{dt^r} + b_{n-1}^{ij} \frac{d^{r-1}}{dt^{r-1}} + \dots + b_0^{ij}, \quad i = \overline{1, p}; j = \overline{1, m}$$

Кожен оператор впливає на функцію x_k наступним чином:

$$L_{ij}x_k^B = a_n^{ij} \frac{d^n}{dt^n} x_k^B + a_{n-1}^{ij} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} x_k^B + \dots + a_0^{ij} x_k^B,$$

Покладемо, що коефіцієнти лінійних диференціальних операторів не залежать від часу, тобто має місце стаціонарна лінійна багатомірна система.

Перетворюючи за Лапасом обидві частини (4.1), знаходимо

$$L_{11}(s)X_1^B(s) + \dots + L_{1p}(s)X_p^B(s) = \tilde{L}_{11}(s)Y_1(s) + \dots + \tilde{L}_{1m}(s)Y_m(s)$$

$$L_{21}(s)X_1^B(s) + \dots + L_{2p}(s)X_p^B(s) = \tilde{L}_{21}(s)Y_1(s) + \dots + \tilde{L}_{2m}(s)Y_m(s)$$

⋮

$$L_{p1}(s)X_1^B(s) + \dots + L_{pp}(s)X_p^B(s) = \tilde{L}_{p1}(s)Y_1(s) + \dots + \tilde{L}_{pm}(s)Y_m(s)$$

або

$$\underbrace{\begin{pmatrix} L_{11}(s) & L_{12}(s) & \dots & L_{1p}(s) \\ L_{21}(s) & L_{22}(s) & \dots & L_{2p}(s) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{p1}(s) & L_{p2}(s) & \dots & L_{pp}(s) \end{pmatrix}}_{L(s)} \underbrace{\begin{pmatrix} X_1^e(s) \\ X_2^e(s) \\ \vdots \\ X_p^e(s) \end{pmatrix}}_{X(s)} = \underbrace{\begin{pmatrix} \tilde{L}_{11}(s) & \tilde{L}_{12}(s) & \dots & \tilde{L}_{1m}(s) \\ \tilde{L}_{21}(s) & \tilde{L}_{22}(s) & \dots & \tilde{L}_{2m}(s) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{L}_{p1}(s) & \tilde{L}_{p2}(s) & \dots & \tilde{L}_{pm}(s) \end{pmatrix}}_{\tilde{L}(s)} \underbrace{\begin{pmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \\ \vdots \\ Y_m(s) \end{pmatrix}}_{Y(s)}. \quad (3.2)$$

Рівняння (3.2) у матричному вигляді

$$L(s)X_B(s) = \tilde{L}(s)Y(s), \quad (3.3)$$

звідки

$$X_B(s) = L^{-1}(s)\tilde{L}(s)Y(s), \quad (3.4)$$

де

$$L^{-1}(s) = \frac{1}{|L(s)|} \begin{pmatrix} a_{11}(s) & \cdots & a_{1p}(s) \\ a_{21}(s) & \cdots & a_{2p}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{p1}(s) & \cdots & a_{pp}(s) \end{pmatrix}^T; \quad (3.5)$$

a_{ij} – алгебраїчне доповнення $A_{ij}(s)$ матриці $L(s)$;

або

$$\underbrace{\begin{pmatrix} X_1^e(s) \\ X_1^e(s) \\ \vdots \\ X_p^e(s) \end{pmatrix}}_{X_e(s)} = \underbrace{\begin{pmatrix} W_{11}(s) & W_{12}(s) & \cdots & W_{1m}(s) \\ W_{21}(s) & W_{22}(s) & \cdots & W_{2m}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{p1}(s) & W_{p2}(s) & \cdots & W_{pm}(s) \end{pmatrix}}_{W(s)} \underbrace{\begin{pmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \\ \vdots \\ Y_m(s) \end{pmatrix}}_{Y(s)}. \quad (3.6)$$

З урахуванням введених позначень (3.5) рівняння (3.6) приймає вигляд

$$X_B(s) = W(s)Y(s), \quad (3.7)$$

де $W(s)$ – матрична передаточна матриця.

Переходячи в (3.6) у часову область, отримаємо наступне:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} x_1^e(t) \\ x_2^e(t) \\ \vdots \\ x_p^e(t) \end{pmatrix}}_{x_e(t)} = \int_0^t \underbrace{\begin{pmatrix} k_{11}(t-\tau) & \cdots & k_{1m}(t-\tau) \\ k_{21}(t-\tau) & \cdots & k_{2m}(t-\tau) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{p1}(t-\tau) & \cdots & k_{pm}(t-\tau) \end{pmatrix}}_{K(t-\tau)} \underbrace{\begin{pmatrix} y_1(\tau) \\ y_2(\tau) \\ \vdots \\ y_m(\tau) \end{pmatrix}}_{Y(\tau)} d\tau. \quad (3.8)$$

або

$$X_e(t) = \int_0^t K(t-\tau)Y(\tau)d\tau, \quad (3.9)$$

де $K(t)$ – матрична імпульсна перехідна функція багатомірної системи.

В іншій постановці об'єкт керування описується рівняннями стану

$$X(t) = AX(t) + BU(t), \quad (3.10)$$

де $A = \text{const}$, $B = \text{const}$

$$X_B(t) = CX(t), \quad (3.11)$$

$$X_B(t) = W(s)Y(s)$$

або в розгорнутому вигляді

$$\begin{pmatrix} X_1^e(s) \\ X_2^e(s) \\ \vdots \\ X_m^e(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11}(s) & W_{12}(s) & \cdots & W_{1m}(s) \\ W_{21}(s) & W_{22}(s) & \cdots & W_{2m}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{m1}(s) & W_{m2}(s) & \cdots & W_{mm}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \\ \vdots \\ Y_m(s) \end{pmatrix}, \quad (3.12)$$

Здебільшого багатомірні системи мають m виходів і m входів. Кожна вхідна уставка (вплив) призначена для відпрацювання «своїм» каналом. В ідеальній системі всі канали розв'язані, управління здійснюється по кожному каналу автономно, кожному скалярному виходу відповідає свій вхід $u_i(t)$.

Тому розмірність входу $Y(t)$ збігається з розмірністю вихідного процесу $x^e(t)$. Структурну схему багатомірної системи автоматичного управління представлено на рис. 3.14.

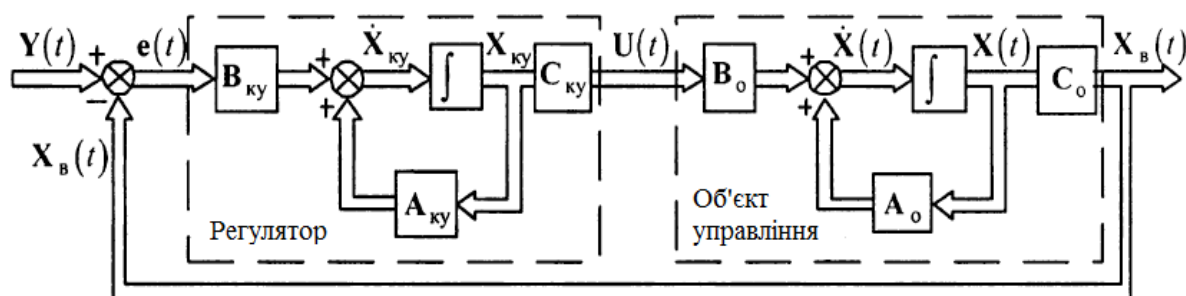


Рис.3.14 Структурна схема багатомірної системи автоматичного управління

Загальна постановка задачі: необхідно знайти матриці $A_{ку}$, $B_{ку}$, $C_{ку}$, такі, що забезпечили б задану якість управління [92, 93]. Це вирішується за умови, що:

1) розмірність виходу об'єкта не повинна перевищувати розмірності його входу;

2) передавальна матриця об'єкта має повний ранг.

Ці умови тісно пов'язані з можливістю виконання умов автономності контурів об'єкта.

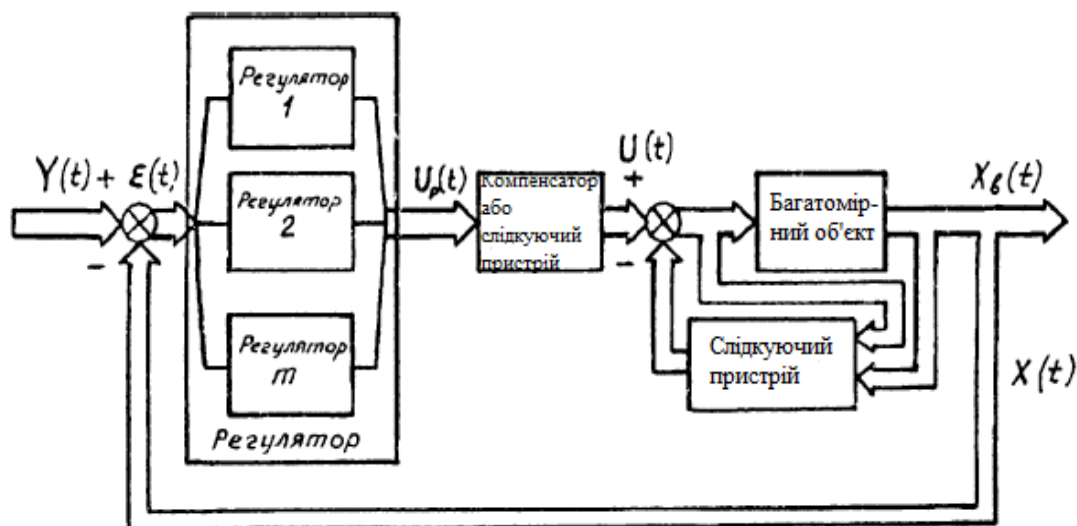


Рис. 3.15 Структурна схема багатомірної системи з регулятором, пристроєм розв'язки каналів і стабілізуючим пристроєм

У структурну схему багатомірної системи (рис. 3.15) входить стабілізуючий пристрій, необхідний для вирішення завдання стабілізації вихідного сигналу об'єкта управління, компенсатор (діагоналізатор), або пристрій розв'язки каналів, призначений для вирішення завдання динамічної розв'язки контурів управління кожної вихідної змінної об'єкта [95-98]; регулятор, мета якого – вирішення завдання корекції показників динамічної якості окремих контурів регулювання.

Викладемо деякі положення, що стосуються розв'язки каналів. Зв'язок між входом і виходом в об'єкті (3.10) задано виразом:

$$\begin{pmatrix} X_1^e(s) \\ X_2^e(s) \\ \vdots \\ X_n^e(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11}(s) & W_{12}(s) & \cdots & W_{1n}(s) \\ W_{21}(s) & W_{22}(s) & \cdots & W_{2n}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{n1}(s) & W_{n2}(s) & \cdots & W_{nn}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \\ \vdots \\ U_n(s) \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

Розглянемо, наприклад, перший вихід об'єкта

$$X_1^e(s) = W_{11}(s) U_1(s) + \dots + W_{1n}(s) U_n(s). \quad (3.14)$$

В багатомірних об'єктах 1-й вихід визначається 1-м входом (головним входом), і, крім цього, на 1-й вихід негативно впливають інші входи. Для незалежності вихідних змінних від інших входів, тобто $u_1(t) \rightarrow x_1(t), i = \overline{1, n}$ необхідно щоб передавальні функції перехресних каналів спрямовувалися до нуля.

Необхідною і достатньою умовою автономності (незалежності каналів) є діагональність передавальної матриці об'єкта [88, 92]:

$$\begin{pmatrix} X_1^e(s) \\ X_2^e(s) \\ \vdots \\ X_n^e(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11}(s) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & W_{22}(s) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & W_{nn}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \\ \vdots \\ U_n(s) \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

В реальних же системах перехресні зв'язки відмінні від нуля і, отже, якість роботи кожного каналу залежить як від властивостей власне каналу, так і від характеру перехресних зв'язків. У зв'язку з цим при постановці завдання синтезу регуляторів в багатомірних системах пред'являються вимоги не тільки до процесів в кожному основному каналі, а й вимоги, які регламентують взаємні впливи каналів. На практиці застосовуються кілька шляхів «розв'язки» каналів.

Один з них – створення спеціальних пристроїв (компенсаторів), які включаються на вході багатомірного об'єкта. Передавальні функції компенсаторів (пристроїв динамічної розв'язки каналів) вибираються таким чином, щоб отримати або строго діагональні передавальні матриці, або матриці з домінуючою в тому чи іншому сенсі діагоналлю. Матриця з домінуючою діагоналлю дозволяє послабити взаємодію між контурами регулювання. Якщо взаємний вплив каналів відсутній, то як матрична передавальна функція розімкнутої системи, так і матрична передавальна функція замкнутої системи, що зв'яже вхід $Y(t)$ і вихід $X_b(t)$ системи, будуть діагональними. Кожен канал може коригуватися незалежно від інших. Розглянемо систему, показану на рис. 3.16 та її рівняння:

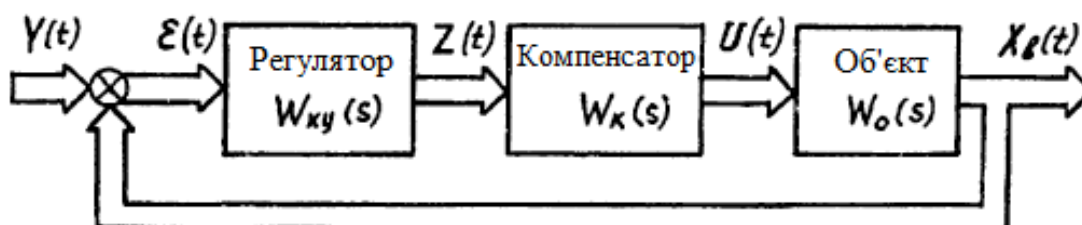


Рис. 3.16 Структурна схема системи

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= Y(t) - X_e(t); Z(s) = W_{ky}(s) E(s); \\ U(s) &= W_k(s) Z(s); X_e(s) = W_o(s) U(s). \end{aligned} \quad (3.16)$$

Звідси

$$X_{\epsilon}(s) = W_o(s) W_{\kappa}(s) W_{\kappa y}(s) E(s) \quad (3.17)$$

Підставивши $E(s) = Y(s) - X_{\epsilon}(s)$ в залежність (3.17), отримаємо

$$\begin{aligned} X_{\epsilon}(s) &= W_o(s) W_{\kappa}(s) W_{\kappa y}(s) [Y(s) - X_{\epsilon}(s)] = \\ &= W_o(s) W_{\kappa}(s) W_{\kappa y}(s) Y(s) - W_o(s) W_{\kappa}(s) W_{\kappa y}(s) X_{\epsilon}(s), \end{aligned} \quad (3.18)$$

звідки випливає, що

$$X_{\epsilon}(s) + W_o(s) W_{\kappa}(s) W_{\kappa y}(s) X_{\epsilon}(s) = W_o(s) W_{\kappa}(s) W_{\kappa y}(s) Y(s)$$

або

$$\left[I + W_o(s) W_{\kappa}(s) W_{\kappa y}(s) \right] X_{\epsilon}(s) = W_o(s) W_{\kappa}(s) W_{\kappa y}(s) Y(s) \quad (3.19)$$

Із формули (3.19) знаходимо основну залежність

$$X_{\epsilon}(s) = \left[I + W_o(s) W_{\kappa}(s) W_{\kappa y}(s) \right]^{-1} W_o(s) W_{\kappa}(s) W_{\kappa y}(s) Y(s) \quad (3.20)$$

Умова відтворення сигналу $Y(t)$ без похибки:

$$\left[I + W_o(s) W_{\kappa}(s) W_{\kappa y}(s) \right]^{-1} W_o(s) W_{\kappa}(s) W_{\kappa y}(s) = I, \quad (3.21)$$

де I – одинична матриця.

Розглянемо вибір передавальної функції компенсатора. Передавальна функція об'єкта управління

$$W_o(s) = \begin{pmatrix} W_{11}^o(s) & W_{12}^o(s) & \dots & W_{1n}^o(s) \\ W_{21}^o(s) & W_{22}^o(s) & \dots & W_{2n}^o(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{n1}^o(s) & W_{n2}^o(s) & \dots & W_{nn}^o(s) \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

Передавальною функцією регулятора є діагональна матриця

$$W_{\kappa y}(s) = \begin{pmatrix} W_{11}^{\kappa y}(s) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_{22}^{\kappa y}(s) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & W_{nn}^{\kappa y}(s) \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

Отже треба підібрати передавальну функцію компенсатора таким чином, щоб була виконана умова (3.24):

$$\begin{pmatrix} W_{11}^o(s) & W_{12}^o(s) & \cdots & W_{1n}^o(s) \\ W_{21}^o(s) & W_{22}^o(s) & \cdots & W_{2n}^o(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{n1}^o(s) & W_{n2}^o(s) & \cdots & W_{nn}^o(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_{11}^k(s) & W_{12}^k(s) & \cdots & W_{1n}^k(s) \\ W_{21}^k(s) & W_{22}^k(s) & \cdots & W_{2n}^k(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{n1}^k(s) & W_{n2}^k(s) & \cdots & W_{nn}^k(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11}^o(s) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & W_{22}^o(s) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & W_{nn}^o(s) \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

Перепишемо (3.24) у вигляді

$$W_o(s) W_k(s) = \text{diag} W_o(s) = W_o^p(s). \quad (3.25)$$

Залежність (3.25) дозволяє знайти матричну передаточну функцію компенсатора

$$W_k(s) = W_o^{-1}(s) \text{diag} W_o(s) \quad (3.26)$$

Схему з динамічним компенсатором показано на рис. 3.17.

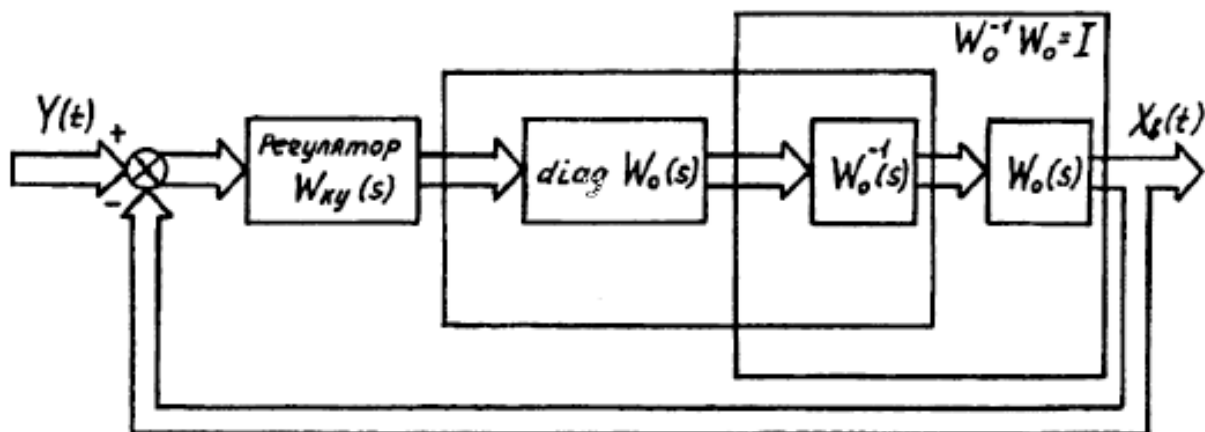


Рис. 3.17. Структурна схема системи з динамічним компенсатором

Передаточна функція замкнутої системи:

$$\begin{aligned} W(s) &= \left[I + W_o(s) W_o^{-1}(s) \text{diag} W_o(s) W_{ky}(s) \right]^{-1} \times \\ &\times W_o(s) W_o^{-1}(s) \text{diag} W_o(s) W_{ky}(s) = \\ &= \left[I + \text{diag} W_o(s) W_{ky}(s) \right] \text{diag} W_o(s) W_{ky}(s). \end{aligned} \quad (3.27)$$

Із виразу (3.27) видно, що $W_o^{-1}(s) W_o(s) = I$, таким чином, динаміка об'єкта компенсується оберненою передаточною функцією, а передаточна матриця прямого ланцюга діагональна

$$W_p(s) = \text{diag} W_o(s) W_{ky}(s)$$

Передаточна матриця замкнутої системи також діагональна і синтез регуляторів можна проводити по кожному каналу окремо.

3.3.2 Розробка математичної моделі автономної оптимальної САК процесами в мінісушарці

На відміну від стандартної постановки задачі компенсації взаємозв'язків каналів в об'єкті керування (розділ 3.3.1), у мінізерносушарці, що розробляється маємо каскадне ввімкнення двомірної моделі сушильної камери і двомірної моделі виконавчого механізму (нагрівача–вентилятора). Відповідно спроектуємо двокаскадну систему компенсаторів–діагоналізаторів для виконавчого пристрою і для сушильної камери.

3.3.2.1 Синтез діагоналізатора виконавчого механізму

Структурну схему виконавчого механізму сушарки зображена на рис. 3.18. Її недоліком є те, що керуючий вплив по одному з каналів впливає й на інший канал, що унеможлиблює автономне управління процесом. Для розв'язки взаємного впливу каналів керування температурою та вологістю всередині виконавчого механізму введемо в систему діагоналізатори [96] (компенсатори (3.26)) та визначимо їх передаточні функції:

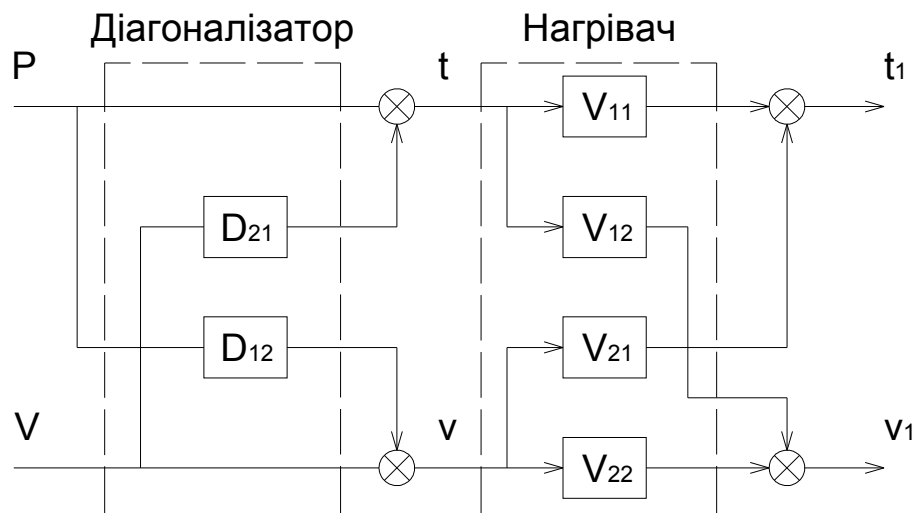


Рис. 3.18. Структурна схема нагрівача повітря з діагоналізатором

де P – потужність нагрівача; V – об’єм сушильного агента, що подається до сушильної камери; D_{12} та D_{21} передавальні функції компенсатора–діагоналізатора, V_{11} , V_{12} , V_{21} , V_{22} – передавальні ланки прямих та перехресних зв’язків виконавчого механізму; t_1 – температура зерна на виході з сушильної камери; v_1 – вологість зерна на виході з сушильної камери.

Відповідно до розділу 3.3.1 приведемо синтез діагоналізатора. Запишемо температуру та вологість агента сушіння на виході з нагрівача:

$$t_1 = (P + V \cdot D_{21}) \cdot V_{11} + (V + P \cdot D_{12}) \cdot V_{21}, \quad (3.28)$$

$$\gamma_1 = (V + P \cdot D_{12}) \cdot V_{22} + (P + V \cdot D_{21}) \cdot V_{12}. \quad (3.29)$$

Згрупуємо доданки, відносно P та V :

$$t_1 = (P \cdot V_{11} + P \cdot D_{12} \cdot V_{21}) + (V \cdot V_{21} + V \cdot D_{21} \cdot V_{11}), \quad (3.30)$$

$$\gamma_1 = (V \cdot V_{22} + V \cdot D_{21} \cdot V_{12}) + (P \cdot V_{12} + P \cdot D_{12} \cdot V_{22}). \quad (3.31)$$

Винесемо множники P та V за дужки:

$$t_1 = (V_{11} + D_{12} \cdot V_{21}) \cdot P + (V_{21} + D_{21} \cdot V_{11}) \cdot V, \quad (3.32)$$

$$\gamma_1 = (V_{22} + D_{21} \cdot V_{12}) \cdot V + (V_{12} + D_{12} \cdot V_{22}) \cdot P. \quad (3.33)$$

З рівняння (3.32) прирівняємо доданки з множником V до 0, а з рівняння (3.33) – з множником P до 0:

$$V_{21} + D_{21} \cdot V_{11} = 0, \quad (3.34)$$

$$V_{12} + D_{12} \cdot V_{22} = 0. \quad (3.35)$$

Звідки знайдемо передавальні функції діагоналізатора, через обчислені в наступному розділі передаточні функції V_{21} , V_{12} , V_{11} , V_{22} .

$$W_{D_{21}} = -\frac{V_{21}}{V_{11}} = \frac{2047,76s+4.179}{160s+1},$$

$$W_{D_{12}} = -\frac{V_{12}}{V_{22}} = -\frac{15.517s+0.103}{310s+1}. \quad (3.36)$$

Передавальні функції по каналах температури та вологості вже розв'язаної системи:

$$W_{t_1} = \frac{4.743 \cdot 10^6 s^2 + 4.352 \cdot 10^4 s + 83.49}{2.114 \cdot 10^8 s^3 + 2.435 \cdot 10^6 s^2 + 8352s + 8.7} \quad (3.37)$$

$$W_{\gamma_1} = \frac{-4.743 \cdot 10^6 s^2 - 4.352 \cdot 10^4 s - 83.49}{4.985 \cdot 10^7 s^3 + 804670s^2 + 4154s + 6.7} \quad (3.38)$$

Враховуючи гладкість (обмеженість спектру сигналів) спростимо (3.37), (3.38) за допомогою методу “площ” Сімою при ступінчатих вхідних сигналах $P(t)$, $V(t)$, які мають суттєво ширший спектр, ніж робочі сигнали [107].

Зв'язок коефіцієнтів розкладання в ряд Маклорена передаточної функції з коефіцієнтами передаточної функції для нормованої (поділеної на коефіцієнт підсилення в статистиці) передаточної функції $\frac{B(s)}{A(s)}$:

$$\frac{B(s)}{A(s)} = \sum_{i=0}^{N_e} E_i s^i \quad (3.39)$$

або

$$\frac{1 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_m s^m}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n} = 1 + e_1 s + e_2 s^2 + \dots + e_{N_e} s^{N_e}.$$

Помножимо ліву і праву частини рівняння (3.39) на знаменник передаточної функції:

$$(1 + e_1 s + e_2 s^2 + \dots + e_{N_e} s^{N_e})(1 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n) = 1 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_m s^m.$$

Розкриваючи дужки та прирівнюючи коефіцієнти за однакових степенів s отримаємо систему рівнянь:

$$s^1, e_1 a_1 + e_0 a_1 = b_1;$$

$$s^2, e_2 a_0 + e_1 a_1 + e_0 a_2 = b_2;$$

$$s^3, e_3 a_0 + e_2 a_1 + e_1 a_2 + e_0 a_3 = b_3; \quad (3.40)$$

$$s^{N_e}, e_{N_e} a_0 + e_{N_e-1} a_1 + e_{N_e-2} a_2 + \dots + e_0 a_{N_e} = b_{N_e}.$$

$$\text{Тут } a_0 = b_0 = e_0 = 1.$$

Вважатимемо, що коефіцієнти a_i та b_i з індексами, що перевищують відповідно n та m , дорівнюють нулю. Тоді послідовно розв'язуючи систему (3.40) отримаємо коефіцієнти e_i ряду (3.39):

$$\begin{cases} e_1 = \frac{b_1 - e_0 a_1}{a_0}, \\ e_2 = \frac{b_2 - (e_0 a_2 + e_1 a_1)}{a_0}, \\ e_3 = \frac{b_3 - (e_0 a_3 + e_1 a_2 + e_2 a_1)}{a_0}, \\ \dots \\ e_{Ne} = \frac{b_{Ne} - (e_0 a_{Ne} + \dots + e_{Ne-2} a_2 + e_{Ne-1} a_1)}{a_0}. \end{cases} \quad (3.41)$$

Враховуючи, що $a_0 = 1$, можна записати розв'язок (3.41) системи (3.40) в рекурентній формі:

$$\begin{cases} e_1 = b_1 - e_0 a_1, \\ e_Z = b_Z - \sum_{Z=0}^{Z-1} e_i a_{Z-i}, \quad 2 \leq Z \leq Ne. \end{cases} \quad (3.42)$$

Визначивши коефіцієнти e_n , за алгоритмом (3.42) можна розрахувати по ним коефіцієнти передаточної функції (3.39).

Визначення e_n по нормованій перехідній функції. Перехідну характеристику $h(t)$ нормуємо, тобто зводимо до одиничного коефіцієнта передачі. Досліджуваний об'єкт має самовирівнювання, графік $h(t)$ подано на рис. 3.19. Ряд Маклорена для $W_{H(s)}$:

$$W_H(s) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} \frac{d^i W_H(s)}{ds^i} |s^i = \sum_{i=0}^{\infty} e_i s^i = \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i C_i s^i \quad (3.43)$$

де

$$e_i = \frac{1}{i!} \frac{d^i W_H(s)}{ds^i}, \quad C_i = (-1)^i e_i$$

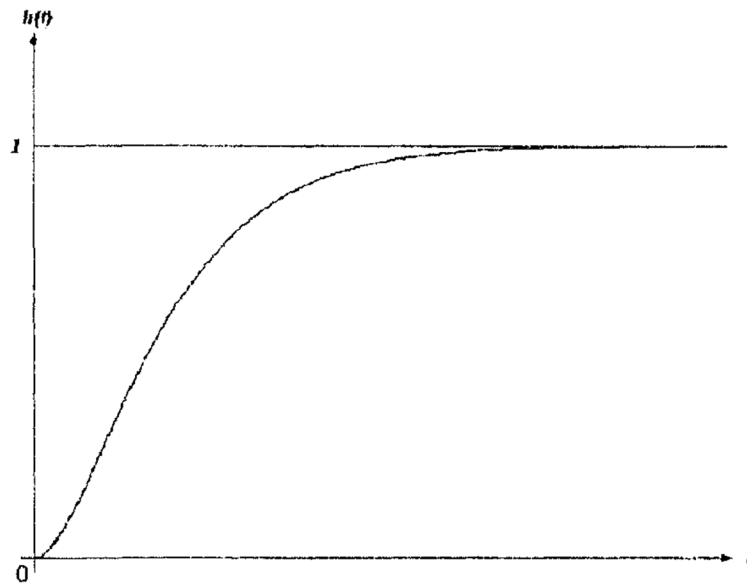


Рис. 3.19. Нормована перехідна характеристика

Позначимо:

$$C_0(t) = h_H(t), C_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} C_0(t)$$

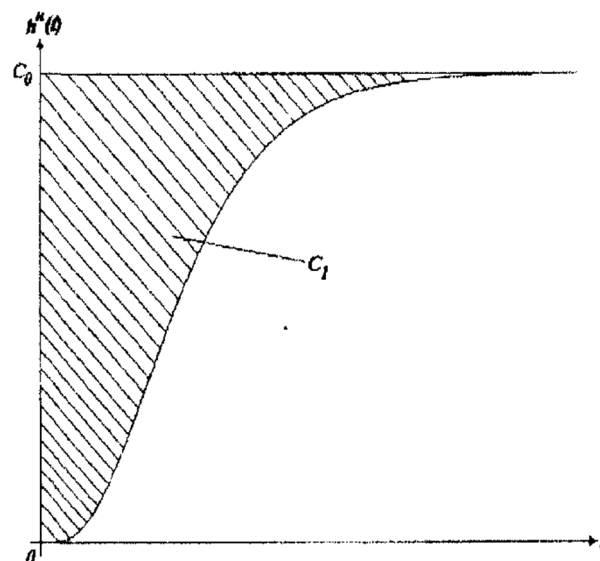
Щоб встановити зв'язок C_i і e_i виконаємо наступні дії. Зображення за Лапласом:

$$L[C_0 - C_0(t)] = \frac{C_0}{s} - \frac{W_H(s)}{s} = \int_0^{\infty} [C_0 - C_0(t)] e^{-st} dt \quad (3.44)$$

Візьмемо в (3.44) за правилом Лопіталя межу якщо $s \rightarrow 0$:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \left[-\frac{dW_H(s)}{ds} \right] = \int_0^{\infty} [C_0 - C_0(t)] dt = C_1$$

Отже, C_1 є площею між $(1=C_0)$ та кривою $C_0(t) = h_H(t)$ (рис. 3.20)

Рис. 3.20. Визначення C_1

Позначимо:

$$C_1(t) = \int_0^{\infty} [C_0 - C_0(t)] dt, \quad C_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} C_1(t) \quad (3.45)$$

Тоді

$$L[C_1 - C_1(t)] = \int_0^{\infty} [C_1 - C_1(t)] e^{-st} dt \quad (3.46)$$

або

$$\frac{C_1}{s} - \frac{1}{s} \frac{W_H(s)}{s} = \int_0^{\infty} [C_1 - C_1(t)] e^{-st} dt \quad (3.47)$$

Розкриваємо невизначеність у лівій частині, послідовно застосовуючи двічі правило Лопіталя:

$$\frac{d^2 W_H(s)}{2ds^2} \Big|_{p=0} = \int_0^{\infty} [C_1 - C_1(t)] dt \quad (3.48)$$

Графічно це показано на рис. 3.21.

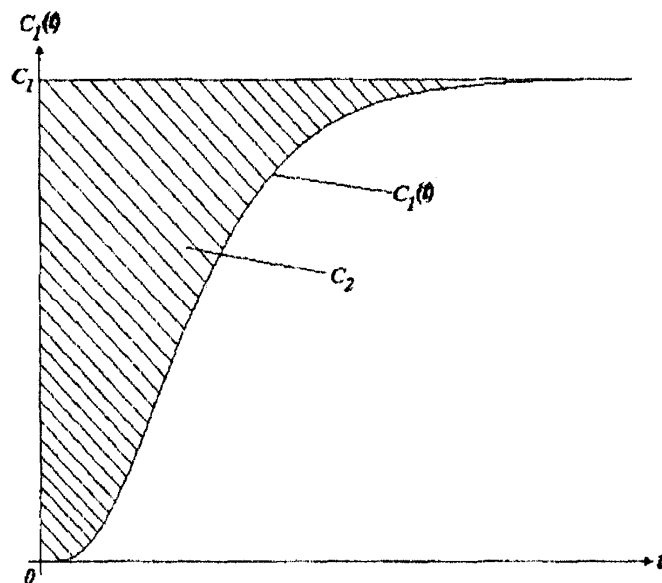


Рис. 3.21. Визначення C_2

Введемо функцію:

$$C_2(t) = \int_0^t [C_1 - C_1(t)] dt, \quad C_2 = \lim_{t \rightarrow \infty} C_2(t)$$

аналогічно як для C_2 , знаходимо C_3 .

$$C_3 = \int_0^{\infty} [C_2 - C_2(t)] dt,$$

У загальному випадку

$$C_i = \int_0^{\infty} [C_{i-1} - C_{i-1}(t)] dt. \quad (3.49)$$

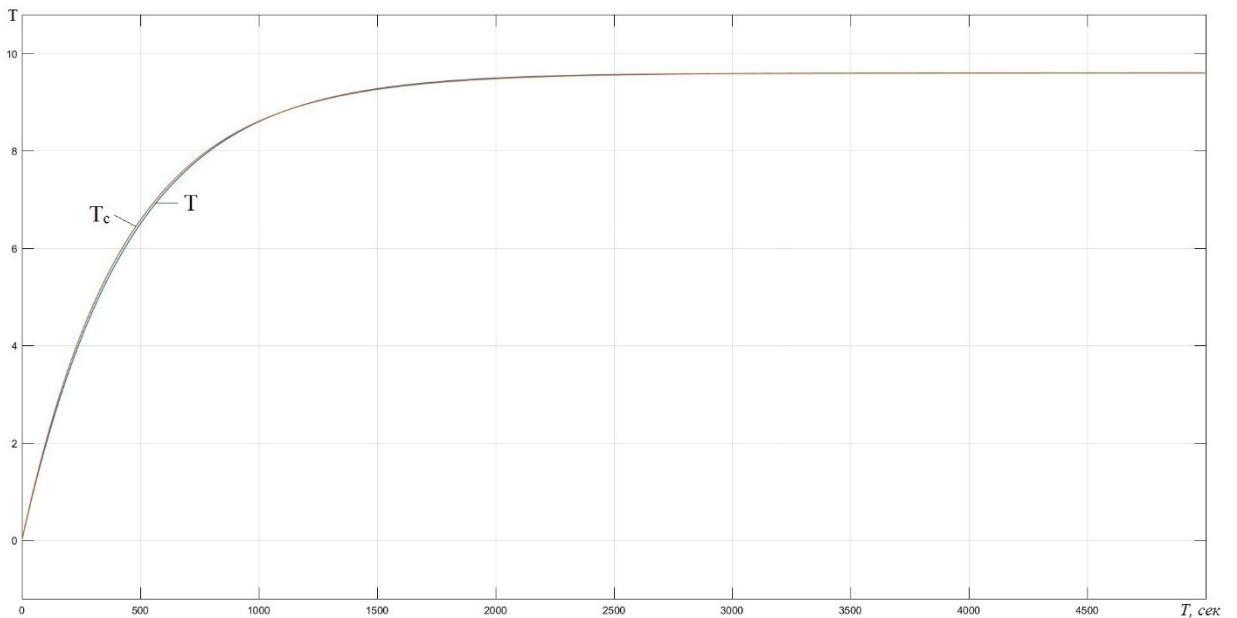
тоді коефіцієнти e_i (3.39) ряду Маклорена, відповідно, дорівнюють:

$$e_i = (-1)^i C_i \quad (3.50)$$

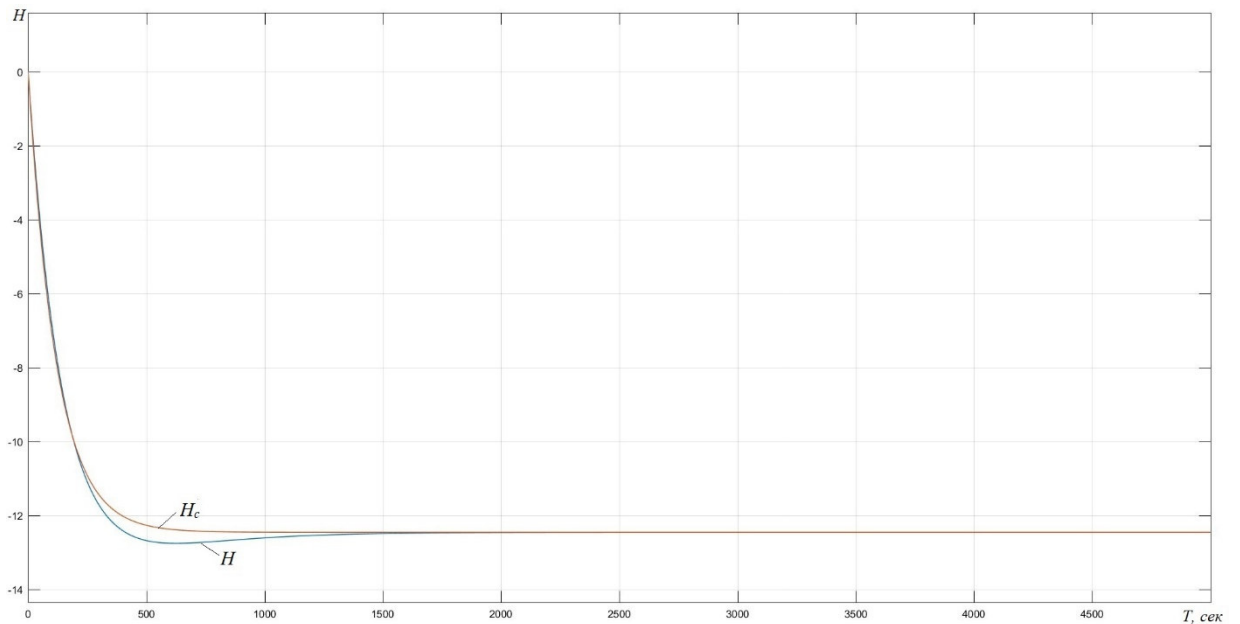
Спростивши за методом Сімою передавальні функції (3.37) та (3.38) отримаємо спрощений зв'язок між вхідними і вихідними змінними нагрівача:

$$W t_1 = \frac{83.49}{3850s + 8.7} \cdot P \quad (3.51)$$

$$W \gamma_1 = \frac{-83.49}{800s + 6.7} \cdot V \quad (3.52)$$



a



б

Рис. 3.22. а – реакція на одиничний ступінчатий вплив передавальної функції виконавчого механізму по каналу температури та її спрощений відповідник; б – реакція на одиничний ступінчатий вплив передавальної функції виконавчого механізму по каналу вологості та її спрощений відповідник

Як видно з рис. 3.22 передавальні функції 3-го порядку (H) з допустимою динамічною похибкою можна замінити еквівалентними функціями 1-го порядку (H_c).

3.3.2.2 Синтез компенсатора–діагоналізатора сушильної камери

До спрощеної схеми (3.51), (3.52) виконавчого механізму з розв'язаними діагоналізатором каналами додамо об'єкт керування – одну із трьох секцій сушильної камери (рис. 3.23):

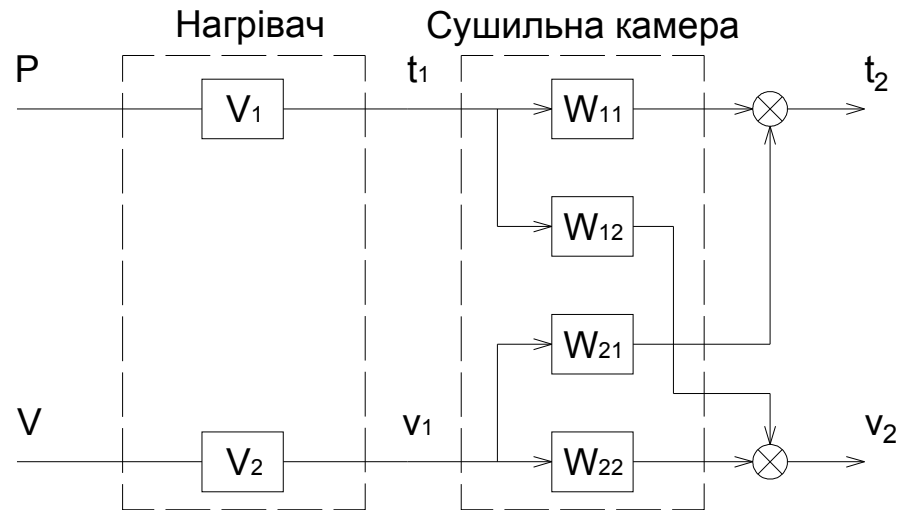


Рис. 3.23. Схема об'єкта керування разом із спрощеним представленням виконавчого механізму з розв'язаними каналами

тут V_1 та V_2 – передавальні ланки виконавчого механізму з діагоналізатором по каналу температури та вологості відповідно; W_{11} , W_{12} , W_{21} , W_{22} – передавальні ланки прямих та перехресних зв'язків об'єкта керування.

Як видно з рис. 3.23 канали керування температурою та вологістю мають взаємний вплив, що унеможливує якісне управління процесом сушіння. Для вирішення цієї проблеми компенсуємо взаємний вплив каналів системи за допомогою діагоналізатора (рис. 3.24), аналогічно як це було зроблено у виконавчому механізмі.

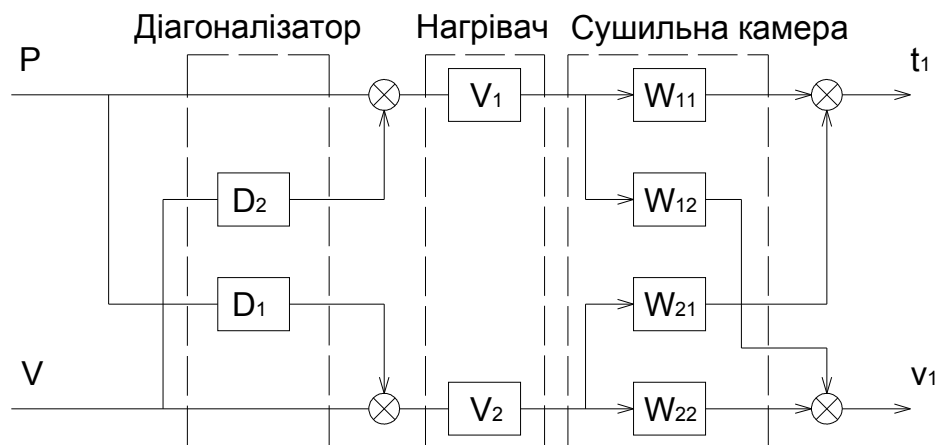


Рис. 3.24. Схема об'єкта керування разом із спрощеним представленням виконавчого механізму з розв'язаними каналами та діагоналізатором

тут D_1 та D_2 перехресні передавальні функції діагоналізатора.

Механізм знаходження передавальних функцій діагоналізатора системи з об'єктом керування аналогічний тому, що був використаний для усунення взаємного впливу каналів у виконавчому механізмові, тому запишемо одразу його результат – передавальні функції:

$$W_{D_1} = \frac{-45,24 \cdot 10^4 s^2 - 4948,85s - 9,7145}{20,2125 \cdot 10^5 s^2 + 8417,5s + 8,7}, \quad (3.53)$$

$$W_{D_2} = \frac{-73,15 \cdot 10^4 s^2 - 3578s - 4,35}{23,96 \cdot 10^4 s^2 + 3057,9s + 6,7}. \quad (3.54)$$

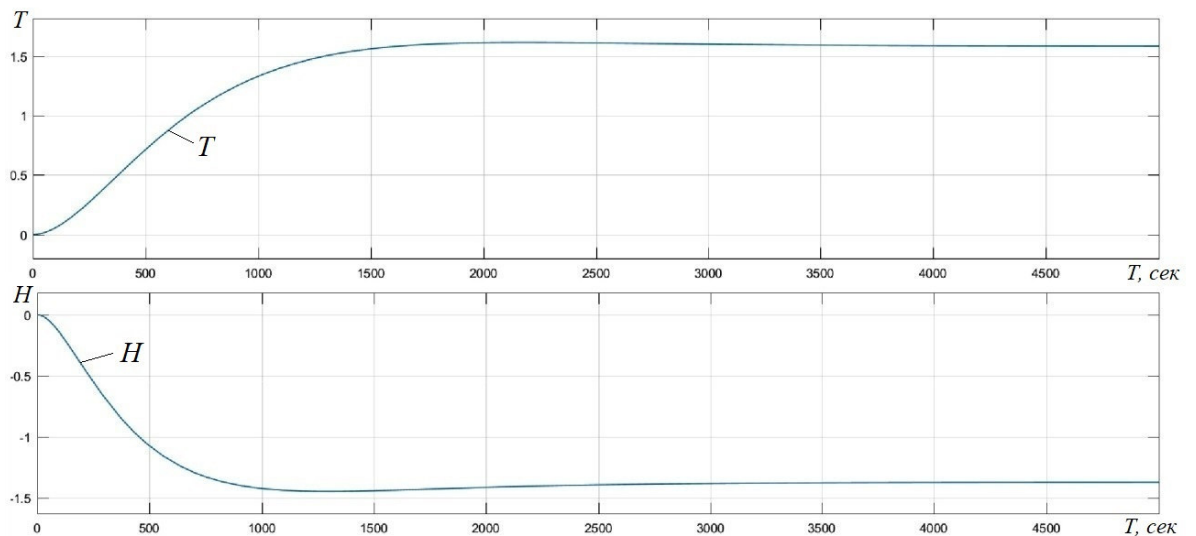


Рис. 3.25. Реакція системи на одиничний ступінчатий вплив по контурах температури та вологості

3.3.2.3 Синтез оптимальних регуляторів

Після вирішення задачі розв'язання взаємного впливу контурів переходимо до синтезу регуляторів системи. Використаємо пропорційно–інтегральні регулятори в контурі температури та вологості. Для знаходження коефіцієнтів (K_p та K_i) регуляторів представляємо складні передавальні функції контурів композицією ланок 1–го порядку та коригуючими пристроями (рис. 3.26).

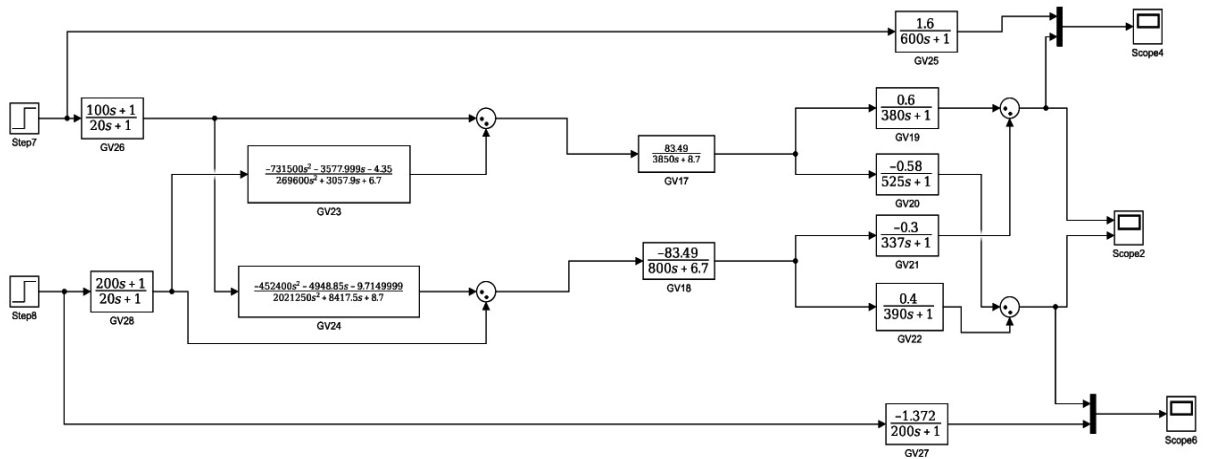


Рис. 3.26. Система з коригуючими ланками в контурах температури та вологості

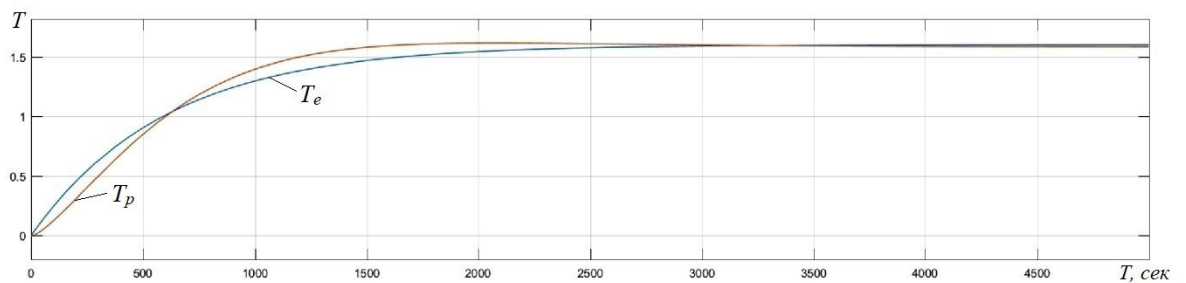


Рис. 3.27. Реакція системи на одиничний ступінчатий вплив по контуру температури: “реальна” (T_p) та спрощена (T_e)

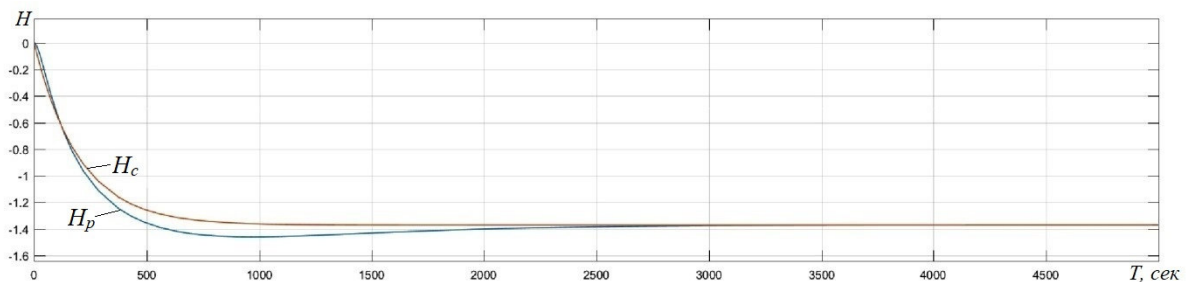


Рис. 3.28. Реакція системи на одиничний ступінчатий вплив по контуру вологості: “реальна” (H_p) та спрощена (H_c)

Як видно з рисунків 3.27 та 3.28 передавальні функції високих порядків контурів температури та вологості можна представити ланками 1-го порядку з незначною похибкою в динаміці перехідного процесу, як реакції на ступінчасту функцію. Додамо у канали керування ПІ-регулятори (рис. 3.29а та рис. 3.29б) та прирівняємо їх передавальні функції до еталонної моделі. В якості еталонної

моделі (рис. 3.30а та рис. 3.30б) використано інтегральну ланку з одиничним зворотнім зв'язком.

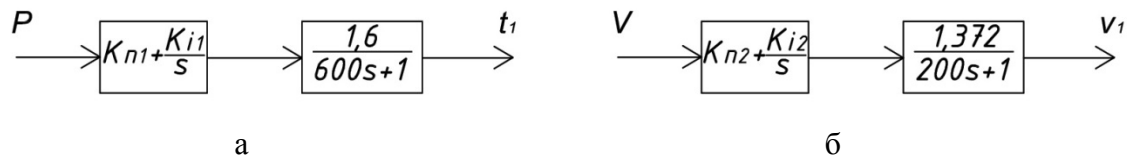


Рис. 3.29. а – контур керування температурою з ПІ-регулятором; б – контур керування вологістю з ПІ-регулятором

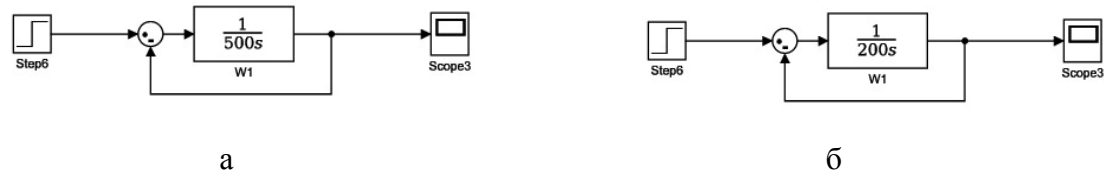


Рис. 3.30. а – еталонна модель контуру температури; б – еталонна модель контуру вологості

Рівняння каналу керування температурою:

$$\left(K_{п1} + \frac{K_{i1}}{s}\right) \cdot \frac{1,6}{600s+1} = \frac{1}{500s}. \quad (3.55)$$

Розкривши дужки рівняння прийме вигляд:

$$\frac{(K_{п1}s + K_{i1}) \cdot 1,6}{(600s+1)s} = \frac{1}{500s}, \quad (3.56)$$

$$\frac{\left(\frac{K_{п1}}{K_{i1}}s + 1\right) \cdot K_{i1} \cdot 1,6}{600s+1} = \frac{1}{500}. \quad (3.57)$$

Звідси $\frac{K_{п1}}{K_{i1}} = 600$ та $K_{i1} \cdot 1,6 = \frac{1}{500}$, тобто оптимальні значення коефіцієнтів

ПІ-регуляторів дорівнюють:

$$K_{i1} = \frac{1}{500 \cdot 1,6} \text{ та } K_{п1} = 600 \cdot K_{i1} = \frac{600}{500 \cdot 1,6}$$

Отже $K_{i1} = 0,00125$ та $K_{п1} = 0,75$.

Коефіцієнти $K_{п2}$ та K_{i2} ПІ-регулятора каналу управління вологістю знаходяться аналогічно: $K_{i2} = 0,00365$ та $K_{п2} = 0,73$.

Визначивши оптимальні (в сенсі ідентичності до еталонної моделі) коефіцієнти ПІ-регуляторів можна змодельовати замкнену систему керування (рис. 3.31) процесом зерносушіння.

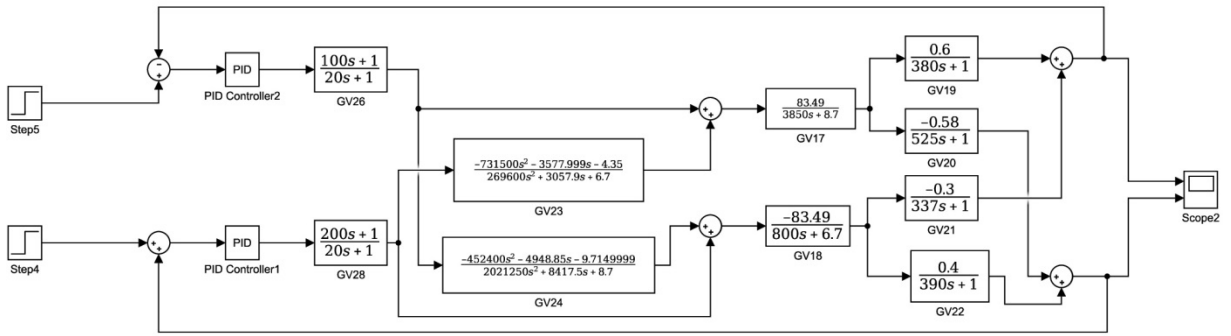


Рис. 3.31. Модель замкненої системи керування процесом сушіння зерна

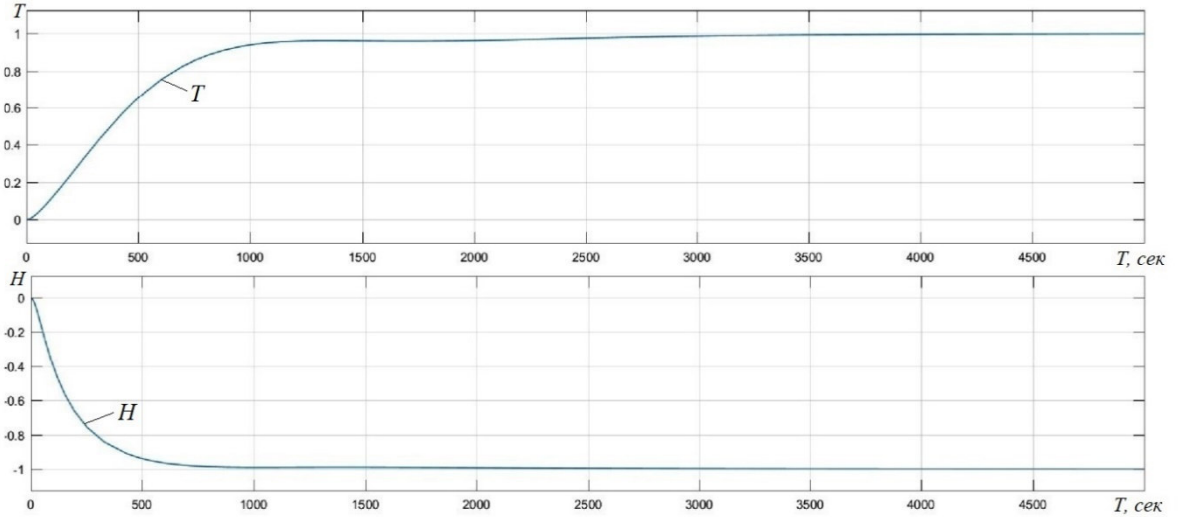
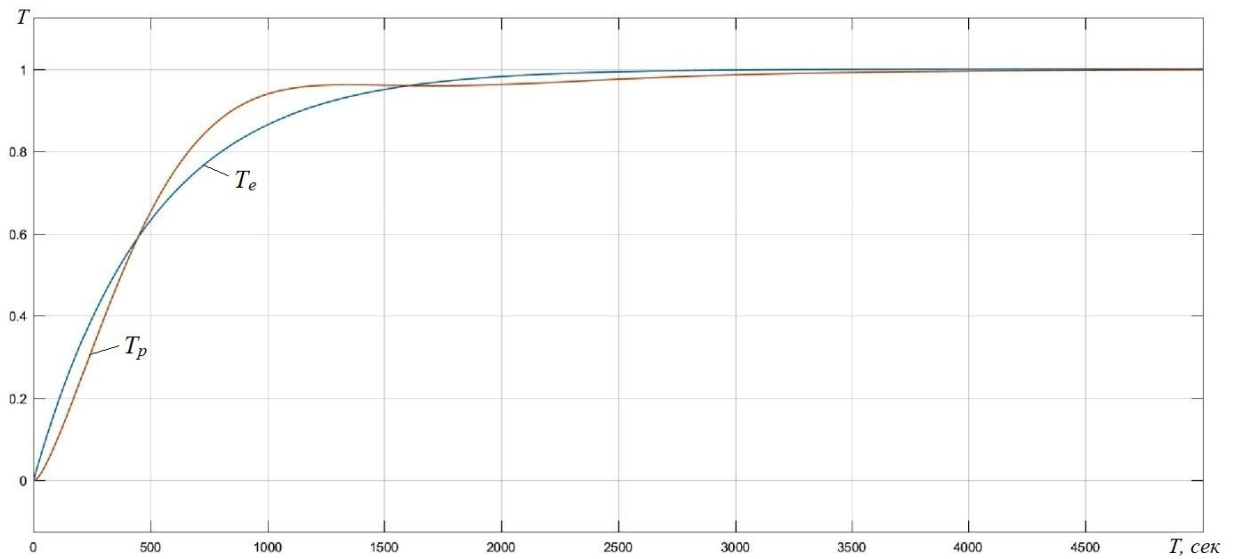
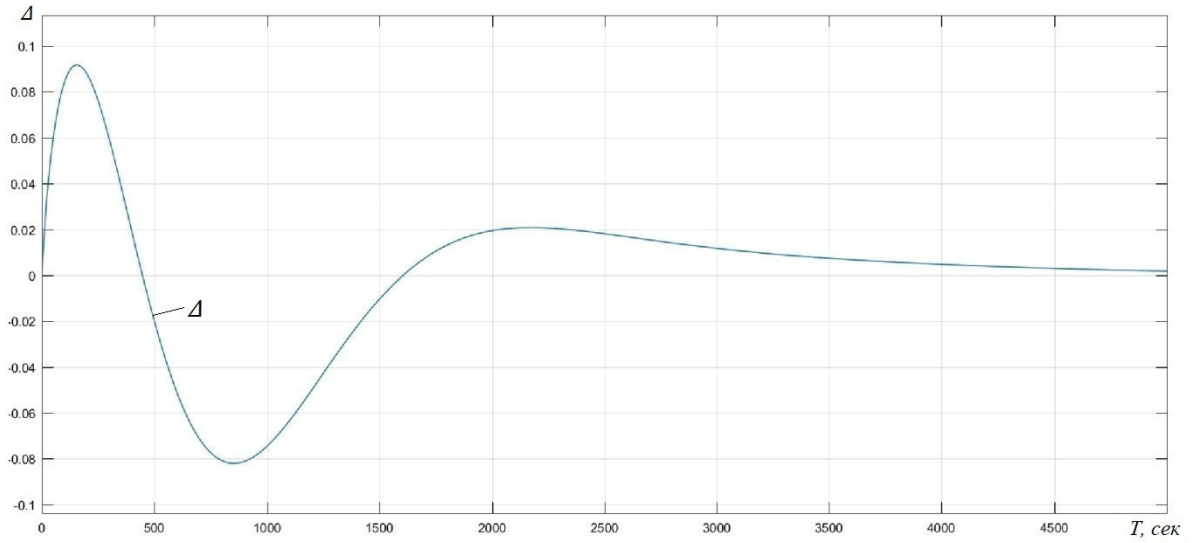


Рис. 3.32. Реакція розробленої системи керування процесом сушіння зерна на одиничний ступінчатий вплив

З рисунка 3.32 видно, що час перехідного процесу по температурі складає 1100 секунд та по вологості – 520 секунд.

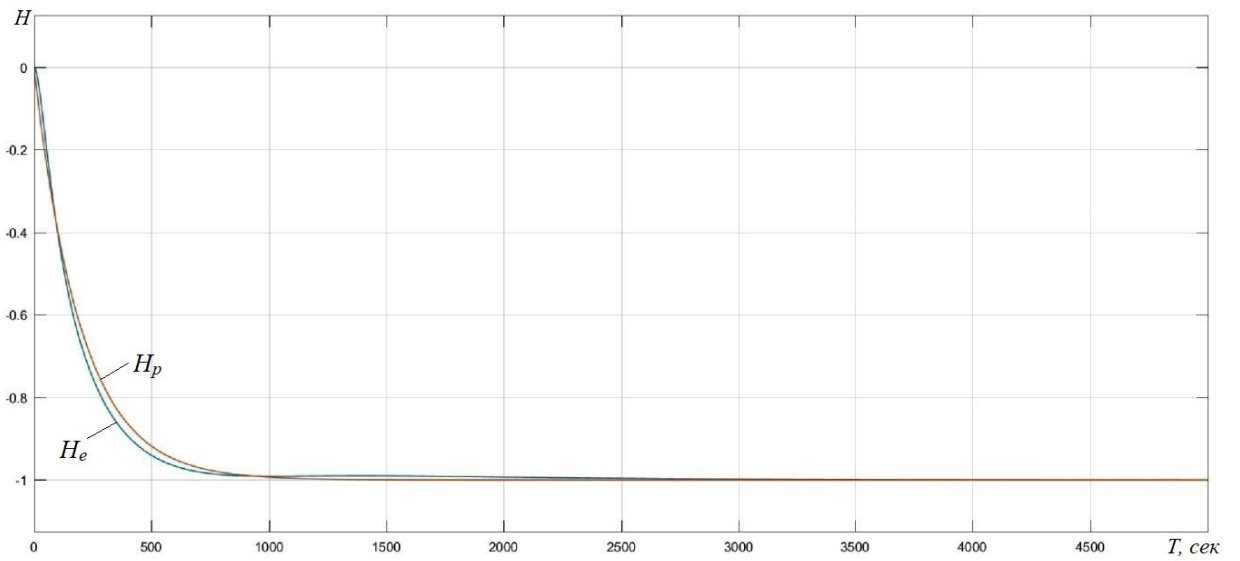


а

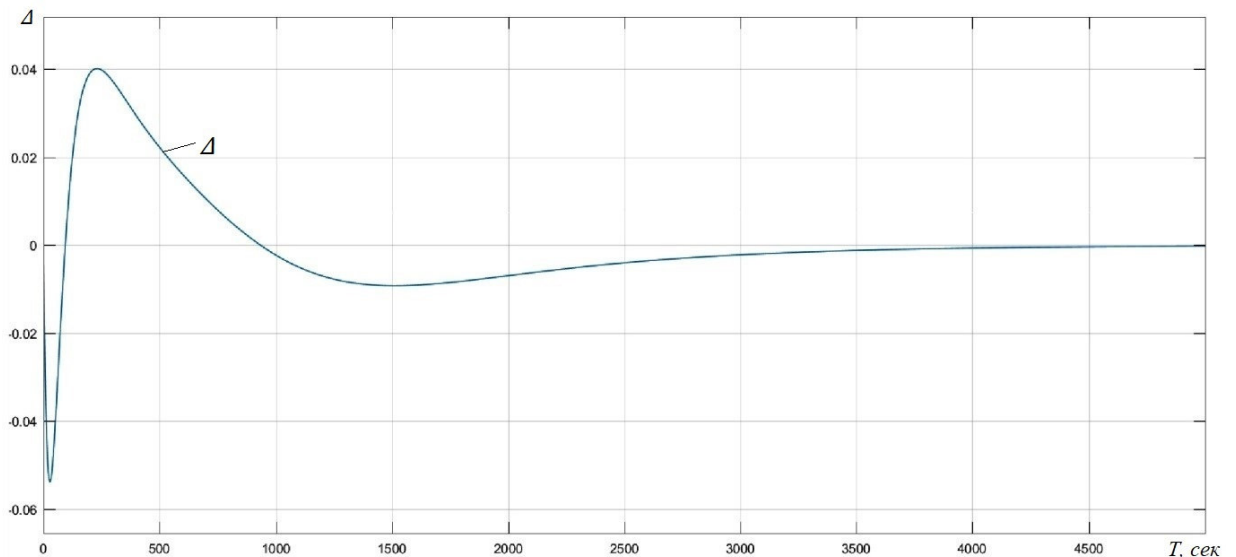


б

Рис. 3.33. а – реакція системи керування процесом сушіння зерна на одиничний ступінчатий вплив по каналу температури та еталонної моделі; б – похибка між еталонною та реальною моделями по каналу температури



а

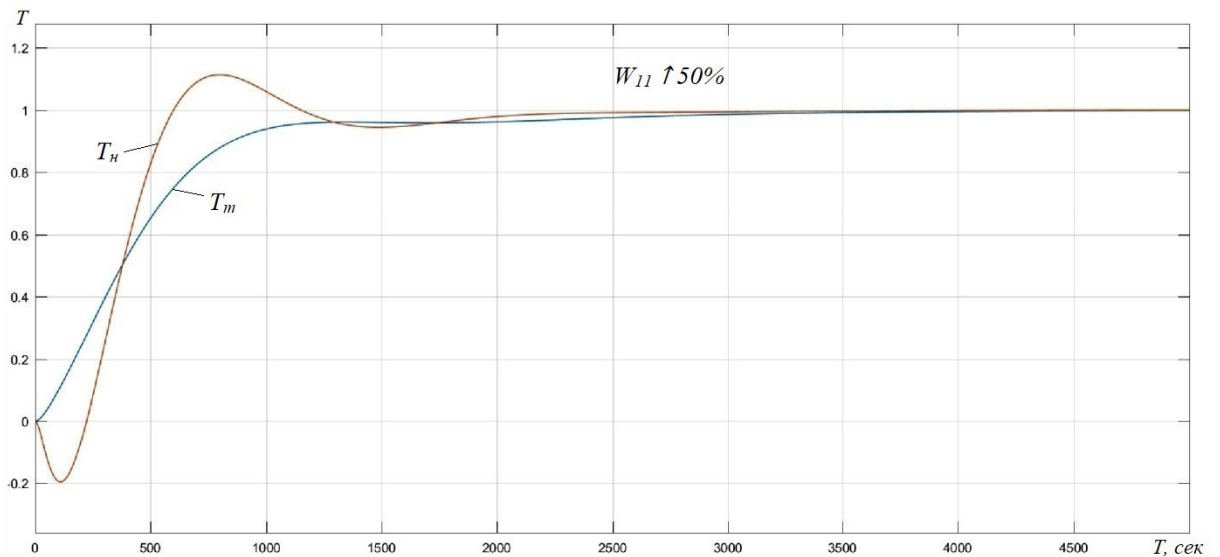


б

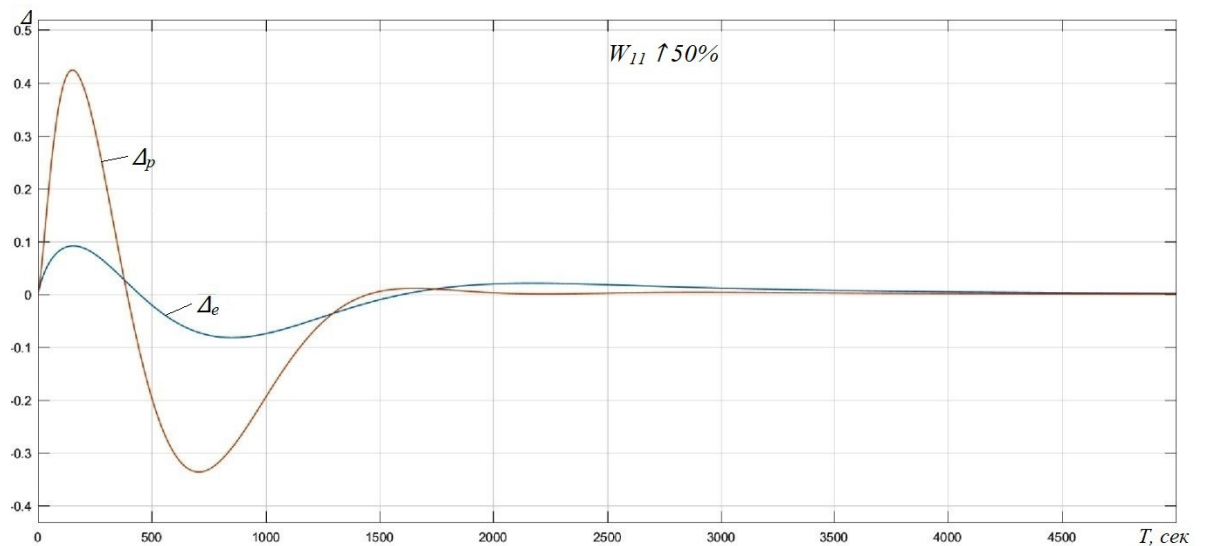
Рис. 3.34. а – реакція системи керування процесом сушіння зерна на одиничний ступінчатий вплив по каналу вологості та еталонної моделі; б – похибка між еталонною та реальною моделями по каналу вологості

3.4 Дослідження робастності системи до неточності математичної моделі об'єкта сушіння

Графіки (3.33) та (3.34) похибок між еталонними та реальними моделями показують, що по каналу температури похибка не перевищує 10% та по каналу вологості не перевищує 0,06%. Дані показники цілком задовольняють вимогам до якості сушіння. Однак, при сушінні зерна в шахтній сушарці його головні параметри (температура та вологість) змінюються, оскільки просушене зерно опускається нижче, а на його місце з надсушильного бункера надходить сире. Тому важливо знати як зміна параметрів об'єкта керування впливає на систему управління. Для дослідження цього процесу коефіцієнти підсилення та сталі часу перехідних функцій будемо змінювати в межах 50% та порівнювати похибки між системою з точними параметрами та зміненими, між системою з діагоналізаторами і без.



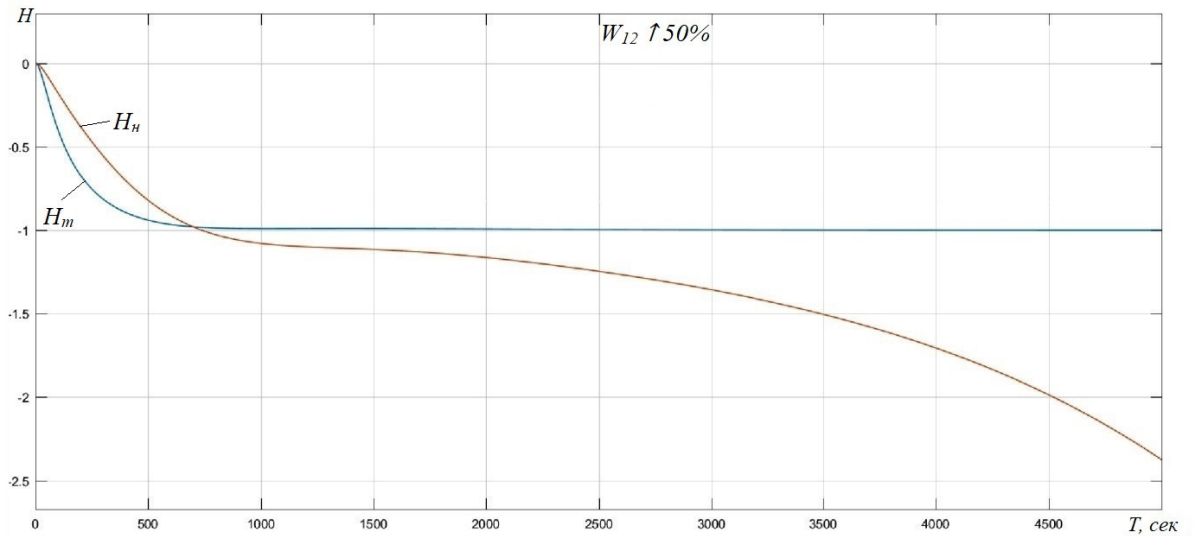
а



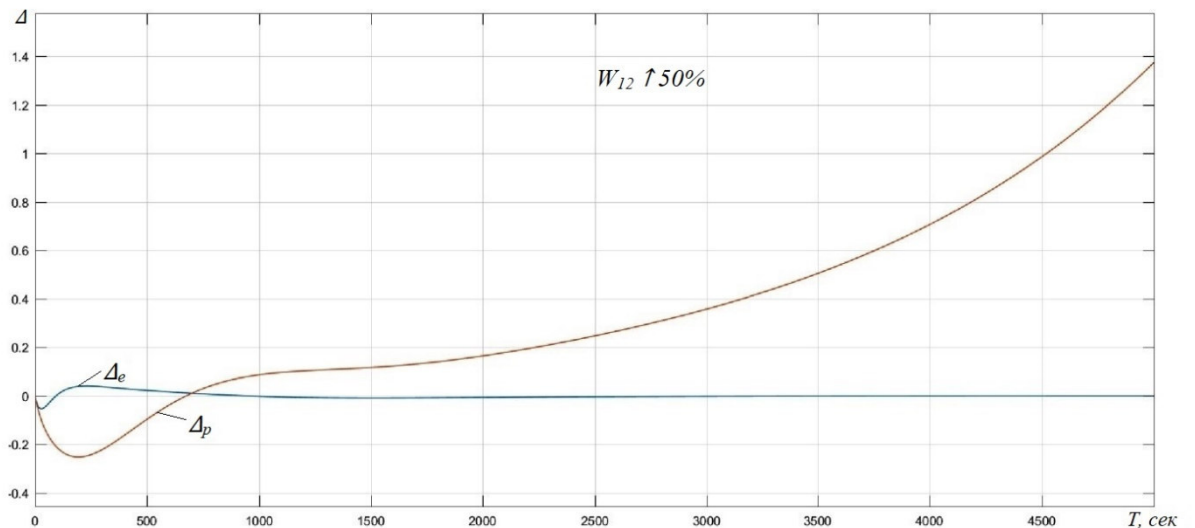
б

Рис. 3.35. а – реакція системи керування процесом сушіння зерна на одиничний ступінчатий вплив по каналу температури при вихідних параметрах та при збільшенні коефіцієнта підсилення ланки W_{11} на 50%; б – графіки похибок між еталонною та реальною моделями по каналу температури при вихідних параметрах та при збільшенні коефіцієнта підсилення ланки W_{11} на 50%

Графіки (рис. 3.35) показують, що при збільшенні коефіцієнта підсилення ланки W_{11} прямого каналу “температура на вході – температура на виході” з’являється перерегулювання по температурі, яке негативно впливає на якість зерна, що сушиться та може призвести до його перегріву, також суттєво збільшується похибка між еталонною та реальною моделями.



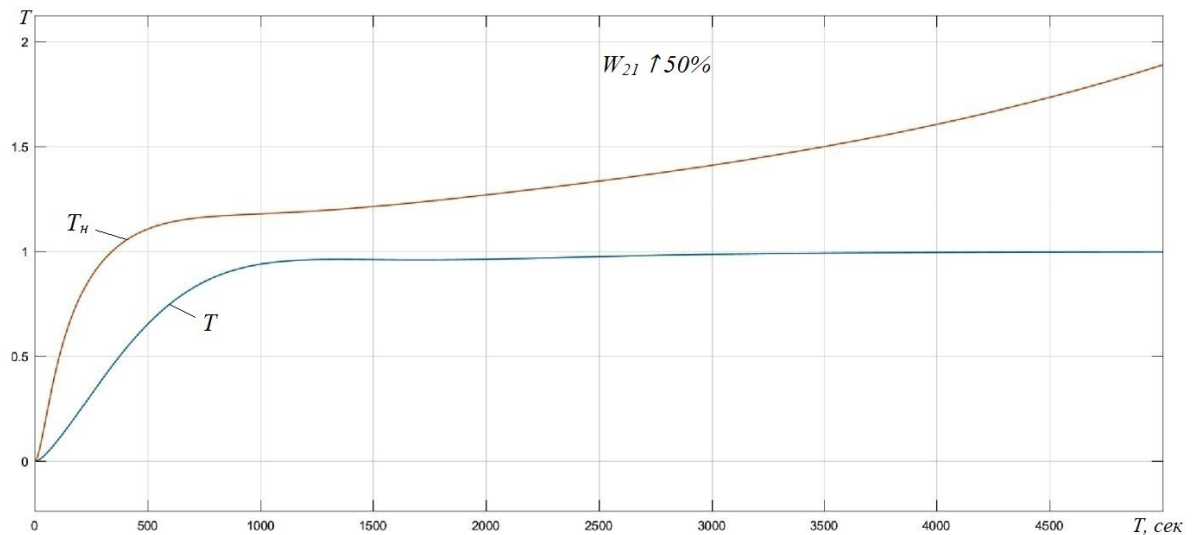
а



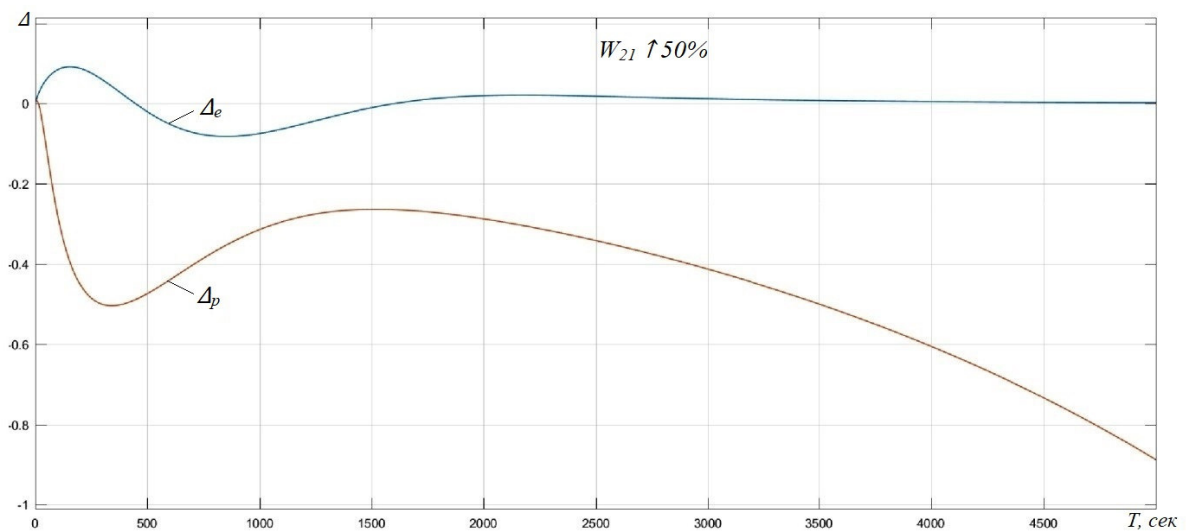
б

Рис. 3.36. а – реакція системи керування процесом сушіння зерна на одиничний ступінчатий вплив по каналу вологості при вихідних параметрах та при збільшенні коефіцієнта підсилення ланки W_{12} на 50%; б – графіки похибок між еталонною та реальною моделями по каналу вологості при вихідних параметрах та при збільшенні коефіцієнта підсилення ланки W_{12} на 50%

Графіки (рис. 3.36) показують, що при збільшенні коефіцієнта підсилення ланки W_{12} перехресного зв'язку “температура – вологість” система втрачає керованість та стає непридатною для управління процесом сушіння.



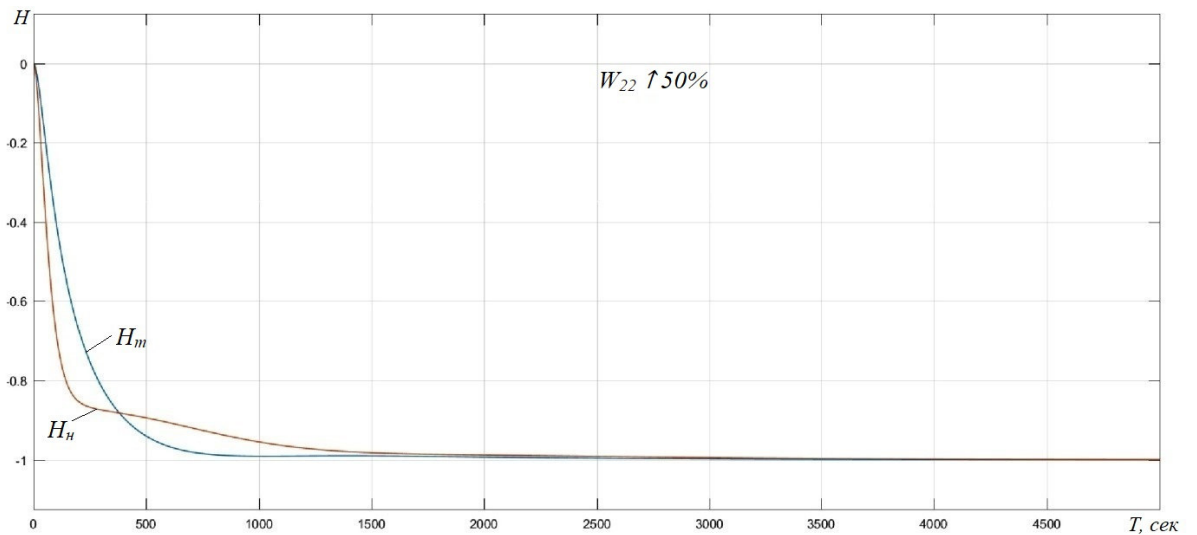
а



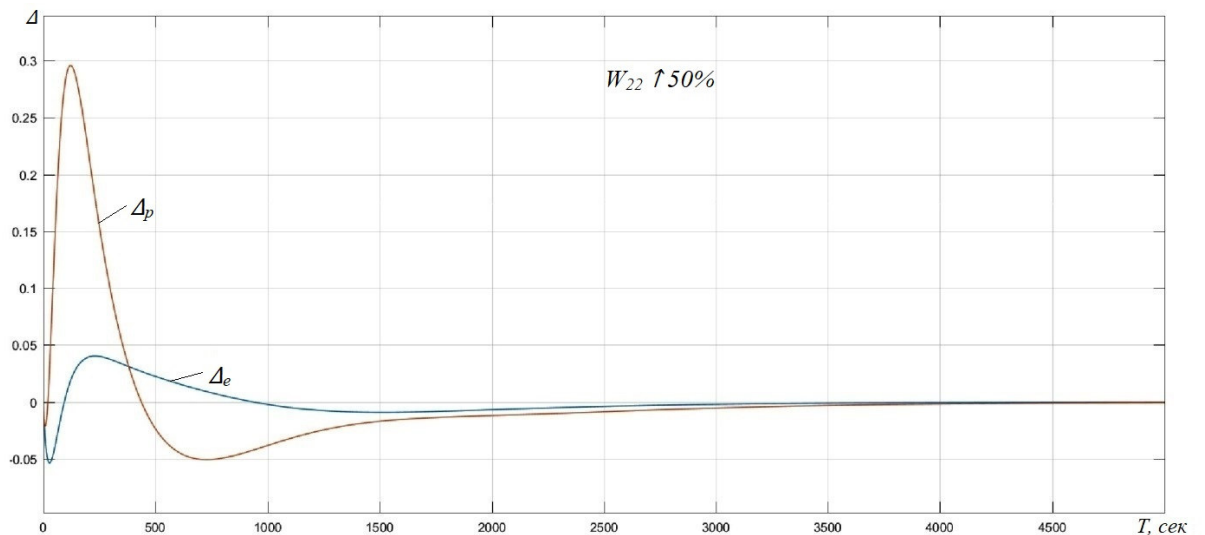
б

Рис. 3.37. а – реакція системи керування процесом сушіння зерна на одиничний ступінчатий вплив по каналу температури при вихідних параметрах та при збільшенні коефіцієнта підсилення ланки W_{21} на 50%; б – графіки похибок між еталонною та реальною моделями по каналу температури при вихідних параметрах та при збільшенні коефіцієнта підсилення ланки W_{21} на 50%

Графіки (рис. 3.37) показують, що при збільшенні коефіцієнта підсилення ланки W_{21} (“вологість – температура”) система втрачає керованість та стає непридатною для управління процесом сушіння.



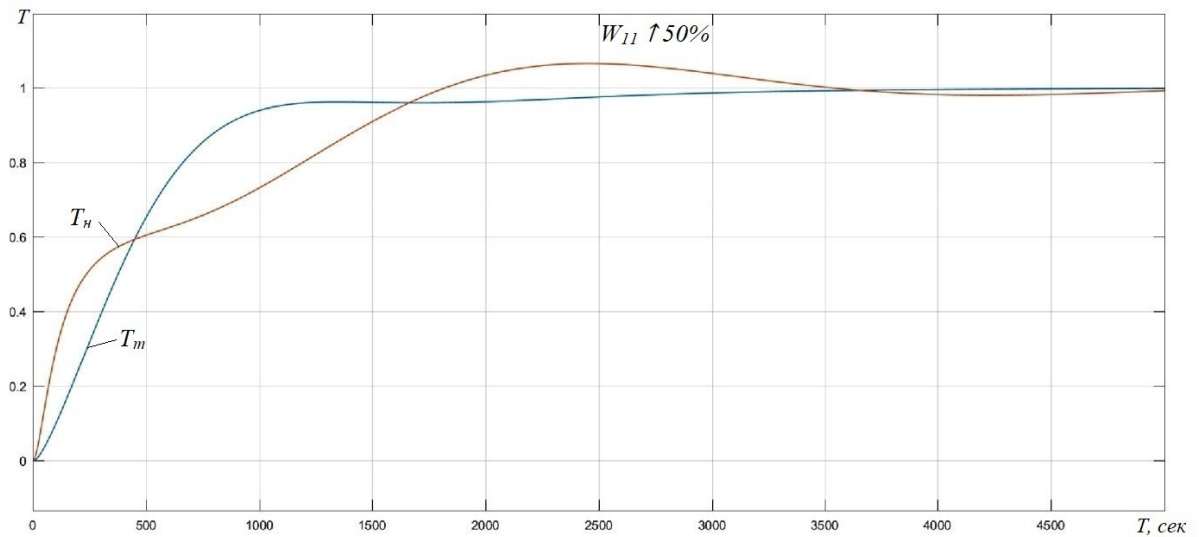
а



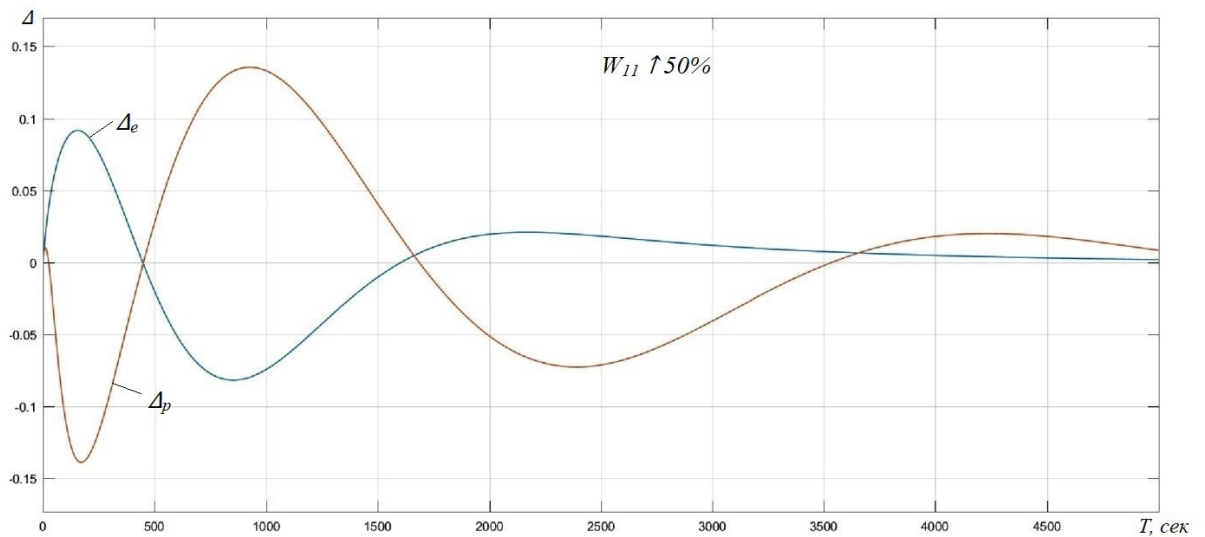
б

Рис. 3.38. а – реакція системи керування процесом сушіння зерна на одиничний ступінчатий вплив по каналу вологості при вихідних параметрах та при збільшенні коефіцієнта підсилення ланки W_{22} на 50%; б – графіки похибок між еталонною та реальною моделями по каналу вологості при вихідних параметрах та при збільшенні коефіцієнта підсилення ланки W_{22} на 50%

Графіки (рис. 3.38) показують, що при збільшенні коефіцієнта підсилення ланки W_{22} (“вологість – вологість”) час перехідного процесу зростає, у зв’язку з цим підвищуються витрати енергетичних ресурсів, а, отже, зростає собівартість зерна, також збільшується і похибка між еталонною та реальною системами.



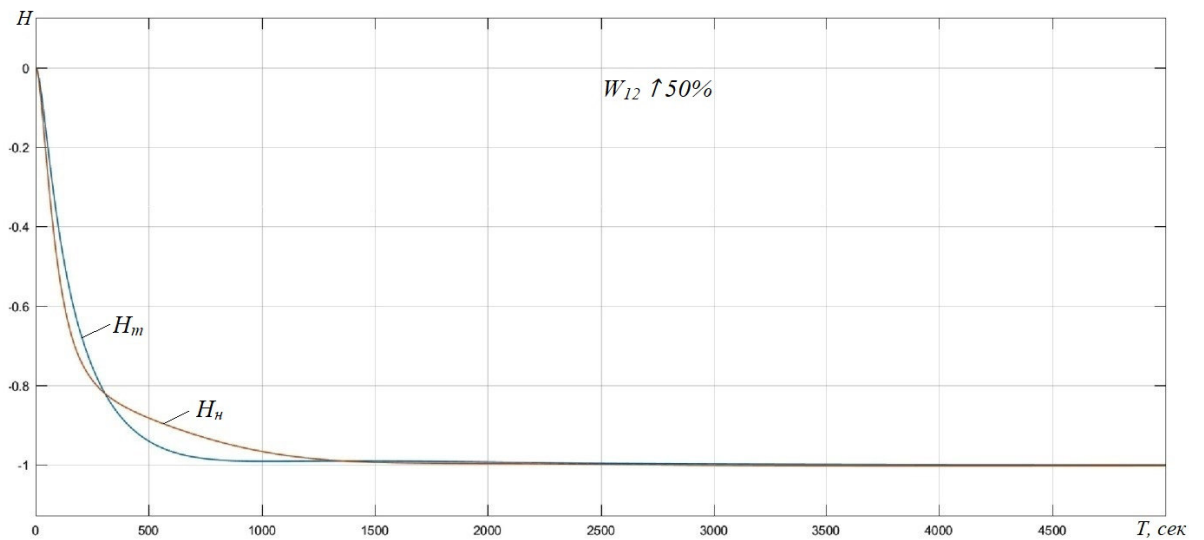
а



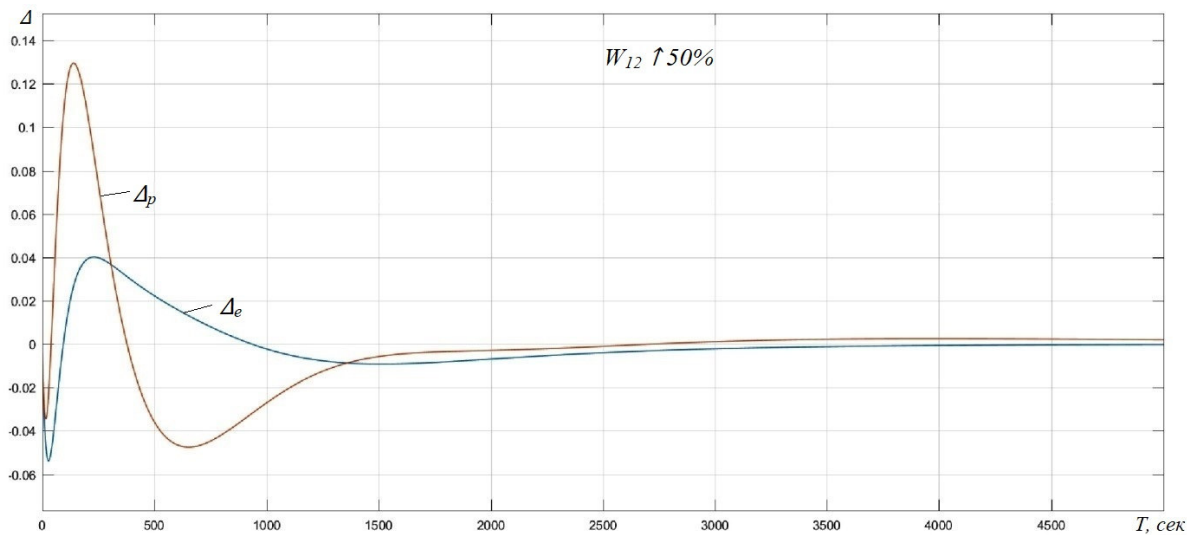
б

Рис. 3.39. а – реакція системи керування процесом сушіння зерна на одиничний ступінчатий вплив по каналу температури при вихідних параметрах та при збільшенні сталої часу ланки W_{11} на 50%; б – графіки похибок між еталонною та реальною моделями по каналу температури при вихідних параметрах та при збільшенні сталої часу ланки W_{11} на 50%

Графіки (рис. 3.39) показують, що при збільшенні сталої часу ланки W_{11} з'являється перерегулювання за температурою, яке негативно впливає на якість зерна, що сушиться, та може призвести до його перегріву, також збільшується похибка між еталонною та реальною моделями.



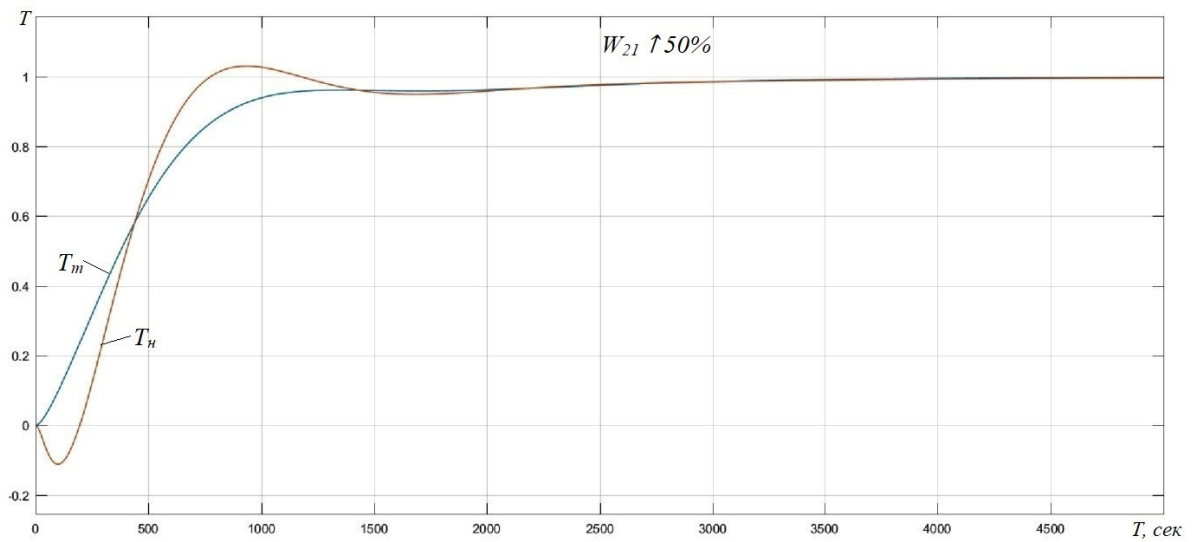
а



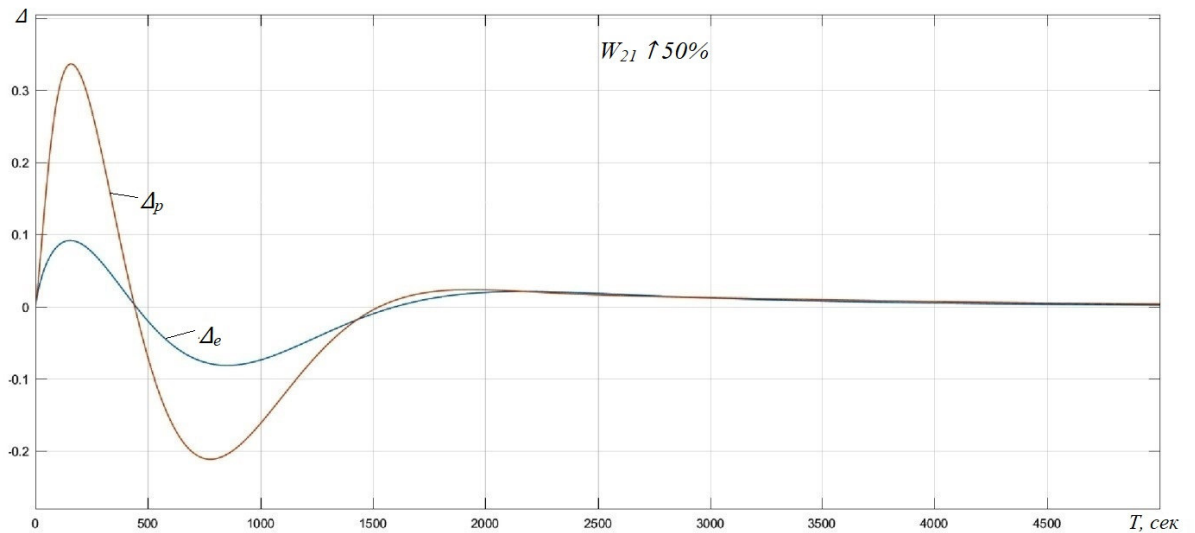
б

Рис. 3.40. а – реакція системи керування процесом сушіння зерна на одиничний ступінчатий вплив по каналу вологості при вихідних параметрах та при збільшенні сталої часу ланки W_{12} на 50%; б – графіки похибок між еталонною та реальною моделями по каналу вологості при вихідних параметрах та при збільшенні сталої часу ланки W_{12} на 50%

Графіки (рис. 3.40) показують, що при збільшенні сталої часу ланки W_{12} (“температура – вологість”) час перехідного процесу зростає, у зв’язку з цим підвищуються витрати енергетичних ресурсів, а, отже, зростає собівартість зерна, також збільшується похибка між еталонною та реальною моделями.



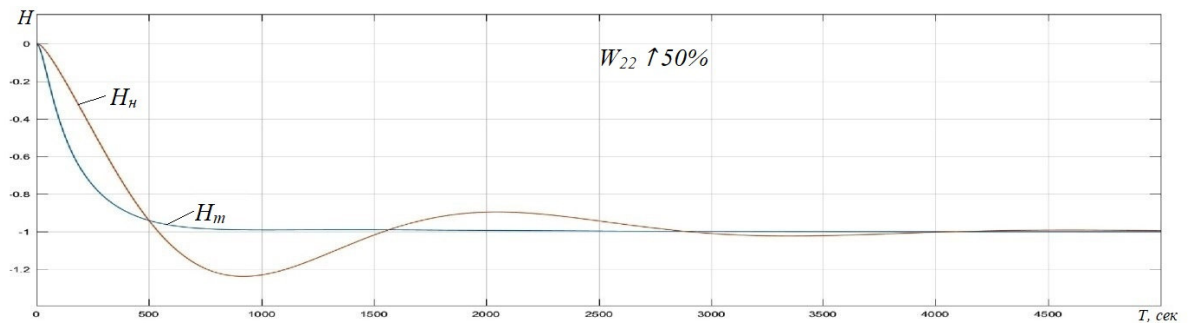
а



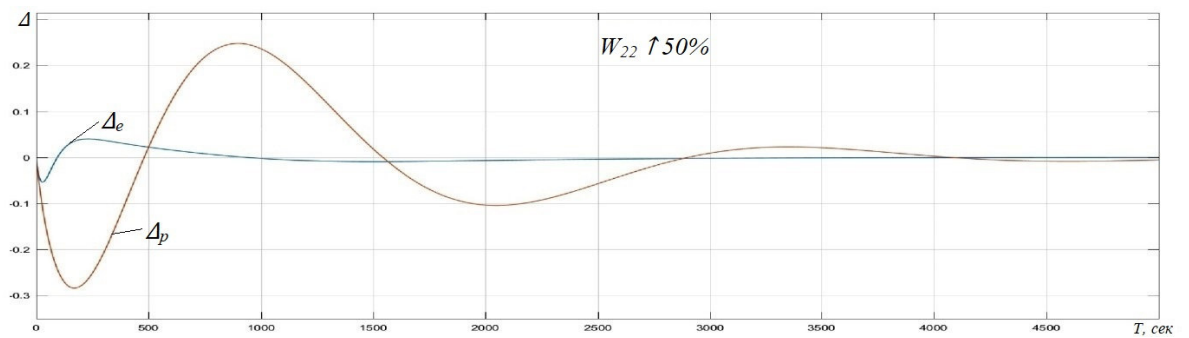
б

Рис. 3.41. а – реакція системи керування процесом сушіння зерна на одиничний ступінчатий вплив по каналу температури при вихідних параметрах та при збільшенні сталої часу ланки W_{21} на 50%; б – графіки похибок між еталонною та реальною моделями по каналу температури при вихідних параметрах та при збільшенні сталої часу ланки W_{21} на 50%

Графіки (рис. 3.41) показують, що при збільшенні сталої часу ланки W_{21} (“вологість – температура”) з’являється перерегулювання за температурою, яке негативно впливає на якість зерна, що сушиться, та може призвести до його перегріву, також збільшується похибка між еталонною та реальною моделями.



а



б

Рис. 3.42. а – реакція системи керування процесом сушіння зерна на одиничний ступінчатий вплив по каналу вологості при вихідних параметрах та при збільшенні сталої часу ланки W_{22} на 50%; б – графіки похибок між еталонною та реальною моделями по каналу вологості при вихідних параметрах та при збільшенні сталої часу ланки W_{22} на 50%

Графіки (рис. 3.42) показують, що при збільшенні сталої часу ланки W_{22} з'являється перерегулювання по вологості. Це негативно впливає на якість системи керування, також збільшується і похибка між еталонною та реальною моделями.

Висновки за розділом

1. Розроблено структуру і алгоритм функціонування багатомірної автономної САК з еталонною моделлю, яка з необхідною якістю відпрацьовує завдання сушіння зерна.

2. Аналізуючи вище приведені графіки можна зробити висновок, що розроблена система керування задовольняє показники якості при визначених параметрах об'єкта керування. Однак у процесі сушіння параметри зерна змінюються. Це призводить до того, що система не може якісно керувати процесом сушіння (з'являється перерегулювання, збільшується час перехідного процесу) або взагалі стає не керованою. Тому для вирішення даної проблеми потрібно відслідковувати зміну параметрів об'єкта керування. Дану задачу вирішує побудова підсистеми ідентифікації. Доповнення системи автономного оптимального (в сенсі відповідності до еталона) керування сушаркою, як багатомірним об'єктом, підсистемою ідентифікації параметрів прямих і перехресних зв'язків в об'єкті керування, дозволить створити функціонально надійну САК в умовах нестационарності і стохастичності характеристик об'єкта.

РОЗДІЛ 4

СТВОРЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ НА ОСНОВІ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ПІДСИСТЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСІВ В СУШАРЦІ

4.1 Використання основ системного підходу як ефективного інструменту побудови підсистеми ідентифікації

Завдання ідентифікації полягає у відображенні невизначеної ситуації, що пов'язана із складним процесом сушіння, у формалізовану, визначену на множині кількісно порівнянних елементів. З умов фізичної реалізованості в роботі [84] подані фундаментальні поняття динамічної систем з точки зору спостерігача. Для гладких систем Р. Калманом доведено, що перехідна функція стану є розв'язком диференціального рівняння

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x, u), \quad (4.1)$$

де $x \in X$, $u(t) = \omega(t) \in \Omega$; $t \in T$; T – впорядкована множина моментів часу; Ω , X – множина вхідних впливів і змінних стану сушарки.

Модель (4.1) являє собою скінченновимірну систему нелінійних нестационарних диференціальних рівнянь, які описують процеси в об'єкті. Із (4.1) (за певних припущень) можуть бути отримані системи лінійних стаціонарних рівнянь (4.2):

$$\dot{x}_1(t) = Ax_1(t) + Bu_1(t); \quad y_1(t) = Cx_1(t), \quad (4.2)$$

де $\dot{x}_1(t)$ – вектор–функція похідних $\{\dot{x}_{1i}(t)\}$, $i = \overline{1, n}$; $x_1(t)$ – вектор–функція $\{x_{1i}(t)\}$, $i = \overline{1, n}$; $u_1(t)$ – вектор–функція $\{u_{1j}(t)\}$, $j = \overline{1, m}$; $y_{1i}(t)$ – вектор–функція вимірювань $\{y_i(t)\}$, $i = \overline{1, r}$; A , B , C – матриці розміру $(n \times n)$, $(n \times m)$, $(r \times n)$ відповідно.

Структура і рангові властивості матриць A , B , C визначають керованість, спостережуваність й ідентифікаційність системи [84].

Головний критерій оптимальності Λ або мета, поставлена системою більш високого рівня ієрархії (*отримання високоякісного зерна*) може мати «розмитий» характер. Формалізація цілі Λ досягається шляхом завдання функціонала, який однозначно в просторі станів X визначає ефективність системи.

Співупорядкована до Λ мета I системи керування це забезпечення екстремального значення I^* функціонала I якості керування. Керуючий вплив $u^*(t)$ (потужність нагрівача і витрати нагрітого повітря сушарки) оптимальний, якщо I з урахуванням початкових умов, рівняння (4.1) та інших обмежень на $x(t)$ і $u(t)$ приймає екстремальне значення. Для знаходження оптимальної стратегії управління $u^*(t)$ реальним об'єктом необхідна його модель, тобто структура і параметри функціонального відображення f (4.1). Визначення відображення f в рівнянні (4.1) за результатами вимірів $x(t)$, $u(t)$ є завданням ідентифікації. Оптимальність моделі \hat{f} (4.3) відображення f

$$\frac{dx_i}{dt} = \hat{f}(t, x_i, u) \quad (4.3)$$

оцінюється критерієм якості ідентифікації J , який повинен бути узгодженим з показником I керування. Модель (4.3), побудовану з урахуванням не тільки функціонала J , але і I , названо цілеорієнтованою [84, 85]. Якщо на множині $\{f_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$) відображень відображення \hat{f} (4.3) для фіксованого $u(t)$ дає екстремальне значення \hat{I}^* , тобто

$$\hat{f} = \arg \operatorname{extr}_{\hat{f}_i \in \{f_i\}} I,$$

то таку модель названо цілеорієнтованою оптимальною. Близькість моделі до цілеорієнтованої оптимальної визначається близькістю вимірюваних змінних $\hat{x}(t), \hat{u}(t)$ до дійсних змінних $x(t)$ і $u(t)$ реального об'єкта. Оцінки $\hat{x}(t), \hat{u}(t)$ сигналів $x(t)$ і $u(t)$ в (4.1) в свою чергу отримують за допомогою фільтрів f_Φ :

$$\frac{d\hat{z}}{dt} = f_{\hat{\circ}}(t, \hat{z}, z), \quad (4.4)$$

де $z(t)$ – вектор–функція виміряних первинними перетворювачами сигналів $x(t)$,

$$u(t), z = \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_x \\ N_u \end{bmatrix}, \quad N_x, N_u – \text{похибки або шуми вимірювання.}$$

Оптимальність фільтрів (4.4) оцінюється критерієм якості фільтрації J_{Φ} . Оскільки f_{Φ} не ідеально перетворює z в (x, u) , то від J_{Φ} буде залежати значення критерію J в задачі ідентифікації відображення \hat{f} в (4.3), від якого (у свою чергу) залежить значення критерію I якості управління реальним об'єктом, від якого залежить головний показник Λ . Фільтр (4.4) *цілеорієнтований*, якщо при його побудові певним чином бралася до уваги задача ідентифікації \hat{f} в (4.3). Якщо відображення f_{Φ} в (4.4) забезпечує екстремальне значення J^* , то фільтр (4.4) буде *цілеорієнтованим* на задачу ідентифікації.

Оптимізація функціоналів I, J, J_{Φ} пов'язана з поняттям релаксаційного процесу [19]. Множина $\{Q_k\}$, $k \geq 0$, кожен елемент якої належить області G нормованого простору, називають релаксаційним процесом (РП) щодо функції $F(Q_k)$, яка оптимізується, якщо послідовність $F(Q_k)$, для упорядкованого за значенням k також впорядкована. В задачі мінімізації $F(Q_0) \geq F(Q_1) \geq F(Q_2) \geq \dots$ РП збігається за функціоналом, якщо $\lim_{k \rightarrow \infty} (F(Q_k) - F(Q^*)) = 0$, і просто збігається, якщо

$$\lim_{k \rightarrow \infty} Q_k = Q^*, \quad \text{де } Q^* – \text{істинне значення.}$$

Визначення РП поширено на випадок, коли елементи Q_k належать області простору, в якому не задано поняття норми або відстані, знак \geq розуміється як символ відношення порядку. Так, в задачі ідентифікації при введенні підмножини структур Σ моделей і множин методів Опт оцінювання вектора β параметрів моделі (Σ, β) РП не є строго релаксаційним. Множину $\{Q_k\}$, $k \geq 0$, названо РП щодо $F(Q_k)$, якщо для будь–якого $k > 0$, існує таке значення $j > 0$, що $F_{k+j} \leq F_k$. Такий РП не є релаксаційним, і збіжність його за функціоналом F або за Q_k залежить від розмірності і впорядкованості підмножини ненормованих елементів (у нашому випадку це $\{\Sigma, \text{Opt}\}$).

4.2 Класифікація систем ідентифікації за ступенем їх досконалості

Системою ідентифікації в загальному вигляді названо прямиий добуток підмножин $\{\Sigma, \beta\}$, $\{Opt, \alpha\}$, $\{J\}$, $\{I\}$, $\{T\}$, що позначається як $\{\{\Sigma, \beta\}, \{Opt, \alpha\}, \{J\}, \{I\}, \{T\}\}$ і наділений структурою, яка дозволяє реалізувати релаксаційний процес $\{Q_k\}$ відносно показника F , такий що $F_{k+j} \leq F_k$, $k = 1, 2 \dots$; $j > 0$; $Q_k \in \{\{\Sigma, \beta\}, \{Opt, \alpha\}\}$ $F_k \in \{\{J\}, \{I\}\}$. Тут $\{\Sigma, \beta\}$ – множини моделей; $\{Opt, \alpha\}$ – множина методів оцінювання вектора β параметрів моделей $\{\Sigma, \beta\}$; α – вектор параметрів методу Opt ; $\{J\}$ – множина оптимізуємих по β методами $\{Opt, \alpha\}$ функціоналів від $\varepsilon(\beta, t)$; $\varepsilon(\beta, t)$ – різниця вимірюваних координат реального об'єкта Σ_∞ і моделі; $\{I\}$ – множина основних функціоналів, що визначають якість вирішення основної задачі для реальної системи Σ_∞ з використанням моделі $\{\Sigma, \beta\}$; $\{T\}$ – множина моментів t_k часу, на якому реальну систему Σ_∞ представлено набором даних $\{u(t_k), y(t_k)\}$ [84, 85]. Забезпечення якості ідентифікації досягається адаптацією [14, 15, 32, 33], що полягає в цілеспрямованій зміні одного, декількох або всіх елементів підмножини $\{Q_k\}$ з метою досягнення екстремуму головного показника F (табл. 4.1). Чим краще алгоритм адаптації, тим ефективніше система. Якщо не враховувати фактор складності, то при адаптації $\{Q_k\}$ результат тим ефективніший, чим ширша підмножина $\{Q_k\}$. Спільним для всіх видів систем ідентифікації є наявність РП $\{\beta_k\}$ щодо показника J , різним – склад підмножин $\{Q_k\}$ і $\{F_k\}$. У табл. 4.1 визначено різні за $\{Q_k\}$ і $\{F_k\}$ типи систем ідентифікації.

Таблиця 4.1

Систематизація систем ідентифікації

№ з/п	Тип системи	$\{Q_k\}$				$\{F_k\}$	
		β	Σ	α	Opt	J	I
1	сі	$\{\beta_k\}$	Σ	α	Opt	J	–
2	СІ	$\{\beta_k\}$	$\{\Sigma\}$	α	Opt	J	–

3	асі	$\{\beta_k\}$	Σ	$\{\alpha_k\}$	Opt	J	–
4	АСІ	$\{\beta_k\}$	$\{\Sigma\}$	$\{\alpha_k\}$	Opt	J	–
5	басі	$\{\beta_k\}$	Σ	$\{\alpha_k\}$	$\{Opt\}$	$\{J_k\}$	I
6	БАСі	$\{\beta_k\}$	$\{\Sigma\}$	$\{\alpha_k\}$	$\{Opt\}$	$\{J_k\}$	I
7	СС	$\{\beta_k\}$	$\{\Sigma\}$	$\{\alpha_k\}$	$\{Opt\}$	$\{J_k\}$	$\{I_q\}$

1. Системи ідентифікації у вузькому сенсі (СІ) реалізують РП $\{\beta_k\}$ щодо J за постійних Σ , Opt , α і порожній множині I , тобто $Q_k = \{\beta_k\}$, $F = J$.

2. Системи ідентифікації в широкому сенсі (СІ) реалізують РП $\{\Sigma_k, \beta_k\}$ щодо J за постійних Opt , α , і порожній множині I , тобто $Q_k = \{\Sigma_k, \beta_k\}$, $F = J$.

$$\{\Sigma^*, \beta^*\} = \arg \min_{\{\Sigma_k, \beta_k\}} J\{\Sigma_k, \beta_k\}.$$

3. Адаптивні системи ідентифікації у вузькому сенсі (асі) реалізують РП $\{\beta_k, \alpha_k\}$ щодо J при постійному Opt і порожній множині I , тобто $Q_k = \{\beta_k, \alpha_k\}$, $F = J$.

4. Адаптивні системи ідентифікації в широкому сенсі (АСІ) реалізують РП $\{\Sigma_k, \beta_k, \alpha_k\}$ щодо показника J при постійному Opt і порожній множині I , тобто $Q_k = \{\Sigma_k, \beta_k, \alpha_k\}$, $F = J$.

5. Багаторазово адаптивні системи ідентифікації у вузькому сенсі (басі) реалізують щодо основного показника I РП $\{\beta_k, Opt_k, \alpha_k\}$ у вигляді композиції двох РП:

а) РП $\{\beta_{kn}\}$, $n = 1, 2, \dots$, щодо J_k ;

б) РП $\{Opt_k, \alpha_k, I_k\}$, $k = 1, 2, \dots$, щодо I ; тобто $Q_k = \{\beta_k, Opt_k, \alpha_k\}$, $F = \{\{I_k\}, \{I\}\}$

Поняття багаторазовості пов'язано з повторенням РП $\{\beta_{kn}\}$ для кожного елемента $\{Opt_k, \alpha_k, I_k\}$ РП більш високого рангу.

6. Багаторазові адаптивні системи ідентифікації в широкому сенсі [84] (БАСІ) реалізують відносно головного показника I РП $\{\Sigma_k, \beta_k, Opt_k, \alpha_k\}$ у вигляді композиції двох РП:

а) РП $\{\beta_{kn}\}$ $n = 1, 2, \dots$, щодо J_k ;

б) РП $\{\Sigma_k, Opt_k, \alpha_k, I_k\}$, $k = 1, 2, \dots$, щодо I , тобто $Q_k = \{\Sigma_k, \beta_k, Opt_k, \alpha_k\}$,

$F = \{I_k, I\}$, де I – показник більш високого рівня.

7. Системи керування, що самоорганізуються (СС) реалізують щодо головного показника $\Lambda(I)$ РП $\{\Sigma_k, \beta_k, Opt_k, \alpha_k, J_k, I_k\}$, у вигляді композиції трьох РП:

а) РП, $\{\beta_{qk}\}$, $n = 1, 2, \dots$ (q і k постійні), щодо J_{qk} зі стаціонарною точкою

$$\beta_{qk} = \arg \operatorname{extr}_{\beta_{qkn}} J_{qk}(\beta_{qkn}, \Sigma_q, Opt_{qk}, \alpha_{qk}) = \arg J_{qk}^*;$$

б) РП $\{J_{qk}^*(\beta_{qk}, \Sigma_{qk}, Opt_{qk}, \alpha_{qk})\}$, $k = 1, 2, \dots$ (q постійне), щодо I_q зі стаціонарною

точкою

$$J_q^* = J_q(\beta_q, \Sigma_q, Opt_q, \alpha_q) = \arg \operatorname{extr} I_q(J_q^*) = \arg I_q^*;$$

в) РП $\{J_q^*(\beta_q, \Sigma_q, Opt_q, \alpha_q)\}$, $q = 1, 2, \dots$, щодо показника Λ більш високого рівня

зі стаціонарною точкою

$$I^* = \arg \operatorname{extr} \Lambda(I_q^*) = \arg \Lambda^*,$$

тобто $Q_k = \{\Sigma_k, \beta_k, Opt_k, \alpha_k\}$, $F = \{J, I_k\}$.

Наприклад, задача вдосконалення проектування і автоматизованого керування процесом сушіння зернових культур.

Λ – показник ефективності підприємства; $\{I_q\} = \{I_1, I_2\}$; I_1 – показник якості стабілізації технологічних змінних x агрегату в області робочих режимів x_0 , що задаються експертами (технологами) виходячи з головного показника Λ ; I_2 – показник якості роботи агрегату; $\{J_{qk}\}$ – множина показників якості ідентифікації

локальними моделями $\{\Sigma_{q_1}, \beta_{q_1}\}$, що відображають перетворення управління u в x ($k = 1$), і моделями якості $\{\Sigma_{q_2}, \beta_{q_2}\}$, що відображають перетворення u в I_2 ($k = 2$).

На першому етапі автоматизації ($I_q = I_1$) за J_{1k} визначають локальні моделі $\{\Sigma_{1k}, \beta_{1k}\}$ за допомогою найпростіших методів ідентифікації $\{Opt_{1k}, \alpha_{1k}\}$. За моделями $\{\Sigma_{1k}, \beta_{1k}\}$ підбирають локальні регулятори, стабілізуючі x в області x_0 за критерієм мінімуму I_1 . Згідно РПп. 7а, 7б визначають оптимальний по I_1 елемент. На другому етапі, після автоматизації процесу збирання і обробки інформації, переходять до побудови більш повної моделі $\{\Sigma_{q_2}, \beta_{q_2}\}$, що пов'язує I_2 зі змінними x , u . По моделям $\{\Sigma_{q_2}, \beta_{q_2}\}$, які містять в собі моделі $\{\Sigma_{q_1}, \beta_{q_1}\}$, уточнюють параметри локальних регуляторів та оптимальне значення x_0^* робочих режимів x_0 . Далі оптимальний (уже за I_2) елемент $\{\Sigma_2^*, \beta_2^*, Opt_2^*, \alpha_2^*\}$ визначають за результатом РП пп. 7а, 7б. Таким чином, перехід від Σ_1 до Σ_2 привів до заміни (згідно РП п. 7в) основного показника I_1^* на I_2^* , як аргументу головного показника Λ (якість зерна).

4.3. Декомпозиція багаторівневої адаптивної системи управління сушильним агрегатом (СА)

Подамо (рис. 4.1) завдання проектування системи і саму систему оптимального адаптивного управління сушаркою у вигляді трьох підзадач і відповідних їм підсистем: оптимального управління СА; ідентифікації відображення вхід–вихід СА; ідентифікації сигналів з давачів СА.

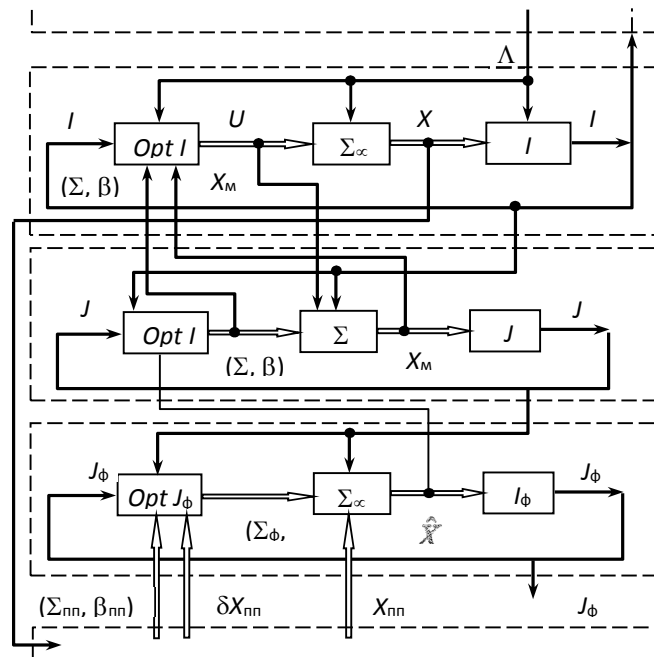


Рис. 4.1. Три рівні оптимізації в багаторівневій системі

Елементи всередині кожної підсистеми утворюють замкнену за місцевим показником якості систему оптимізації, працюючу за алгоритмом систем зі зворотнім зв'язком: видача керуючого впливу на СА; вимір або розрахунок реакції СА; оцінка оптимальності підсистеми за критерієм її рівня. Між собою підсистеми об'єднано прямими (знизу вгору) і зворотними (зверху вниз) зв'язками. Наведемо позначення і фізичний зміст елементів, внутрішніх і зовнішніх прямих і зворотних зв'язків. Підсистема ідентифікації сигналів СА має такі елементи та зв'язки:

J_ϕ – формувач показника якості ідентифікації (фільтрації) вектора x сигналів датчиків СА;

Σ_ϕ – фільтр, що перетворює сигнал виходу первинного перетворювача X_{nn} в його оцінку \hat{X} ;

$Opt J_\phi$ – оптимізатор по J_ϕ структури Σ_ϕ і вектора β_ϕ параметрів фільтра;

Σ_{nn} , β_{nn} – інформація про структуру і параметри первинних перетворювачів (датчиків) фізичних змінних СА Σ_∞ – передаточна функція датчика, статична (тарувальна) характеристика і т. п.;

δX_{nn} – інформація про похибки датчиків;

J, J_{ϕ} – інформація про критерії оптимальності систем ідентифікації СА і його сигналів: J надходить по каналу зворотного зв'язку в дану підсистему, J_{ϕ} – в підсистему первинних перетворювачів.

Підсистема ідентифікації СА містить:

J – формувач показника якості ідентифікації об'єкта;

Σ, β – модель об'єкта зі структурою Σ і вектором β параметрів;

$Opt J$ – оптимізатор за показником J структури Σ і вектора β параметрів моделі;

$\Sigma_{\infty}, \beta_{\infty}, \hat{X}$ – інформація про фільтр і оцінку \hat{X} сигналу X , отриману з сигналу $X_{\text{пп}}$ первинного перетворювача;

$\Sigma, \beta, X_{\text{м}}$ – інформацію про модель (Σ, β) СА і оцінку $X_{\text{м}}$ сигналу X , отриману за сигналом \hat{X} фільтра;

I, J – коригуючі зворотні зв'язки з системи управління в систему ідентифікації і з системи ідентифікації СА в систему ідентифікації сигналів датчиків.

Підсистема оптимального управління СА містить:

I – формувач показника якості управління;

Σ_{∞} – реальний СА (його вхідні і вихідні змінні u і x);

$Opt I$ – оптимізатор показника I по керуючому впливу u ;

x – вихід СА – вхід підсистеми первинних перетворювачів;

u – вхід СА і моделі;

Λ, I – коригуючі зворотні зв'язки із системи більш високого рівня в систему управління і з системи управління в систему ідентифікації відповідно.

Кожен елемент (оптимізатор, модель, формувач критерію) має три складові:

- безпосередньо елемент, зав'язаний на розв'язанні своєї задачі;
- множину таких елементів, упорядкованих за їх властивостями;
- проектор (ПР), що вибирає з множини елементів оптимальний за показником якості системи більш високого рангу.

На рис. 4.2 подано схеми задач проектування і самі системи I, II і III рівнів. Індокси q, qk, qkn відповідають позначенням кроків композиційного релаксаційного процесу створення і оптимізації системи. Наприклад, q – номер

ітерації зміни виду показника I ; qk – відповідно зміни J ; qkn – номер кроку в оптимізації β в системі ідентифікації об'єкта.

Система (база знань) складається з 27 елементів: $\{Opt J_{\delta}^q\}$, $\{Opt J_q\}$, $\{Opt I_q\}$ – множини методів оптимізації, критеріїв $\{J_{\delta}^q\}$, $\{J_q\}$, $\{I_q\}$ і моделей $\{\Sigma_{\delta}^q\}$, $\{\Sigma_q\}$, $\{\Sigma_{\infty}^q\}$. Для конкретного критерію теоретично існує єдиний оптимальний набір цих елементів і їх параметрів. Задача полягає у виборі «відповідного» (близького за I_q до оптимального) набору при обмежених витратах на його пошук в системі. Для того щоб дана декомпозиція не призвела до ускладнень, необхідний ретельний аналіз підсистем та їх елементів, який дозволяє з допомогою проєкторів ПР систем кожного рівня (рис. 4.2) істотно звужити множини елементів до обмежених підмножин претендентів на оптимальні для конкретної ситуації.

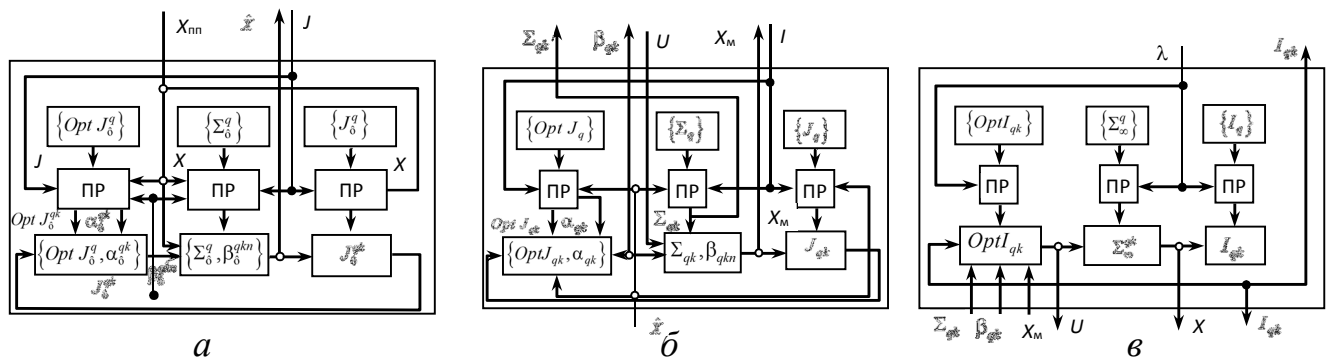


Рис. 4.2. Цілеорієнтована підсистема: а – ідентифікації сигналів; б – ідентифікації об'єкта; в – оптимального адаптивного керування об'єктом

4.4. Принцип узгодженості показників якості підсистем багаторівневої системи управління СА

Для ієрархічної системи управління (рис. 4.1, 4.2) існує одне значення для елементів множини

$$\{I, OptI, J, OptJ, \Sigma, \beta, I_{\phi}, OptI_{\phi}, \Sigma_{\phi}, \beta_{\phi}, I_{\text{пп}}, OptI_{\text{пп}}, \beta_{\text{пп}}\}, \quad (4.5)$$

за якого головний показник Λ (якість зерна) оптимальний, якщо не враховувати витрати на пошук цього значення. Реальні оптимізаційні задачі не можуть не

враховувати ці втрати. Тому процес відшукування абсолютного екстремуму зупиняється на певному етапі. За повної відсутності інформації про залежність головного показника Λ від елементів множини пошук екстремуму виконується методом перебору: з усіх n можливих значень m змінних множини F (табл. 4.1) вибирається m оптимальних значень. Загальне число кроків РП $C_n^m = \frac{n!}{(n-m)!}$ для реальних значень m і n надмірно велике. Задача спрощується, якщо кожен з функціоналів $\Lambda, I, \dots, I_{ii}$ оптимізується на підмножині змінних свого рівня: $X, u, \dots, (\Sigma_{mn}, \beta_{mn})$. Це призводить до композиції умовно оптимальних рішень:

$$\begin{aligned} \Lambda^* &= \text{extr} \Lambda \\ x \Big|_{I^* = \text{extr} I} \\ u \Big|_{J^* = \text{extr} J} \\ (\Sigma, \beta) \Big|_{J_\phi^* = \text{extr} J_\phi} \\ (\Sigma_\phi, \beta_\phi) \Big|_{J_{nn}^* = \text{extr} J_{nn}} \\ (\Sigma_{nn}, \beta_{nn}) \Big|_{\dots}, \end{aligned} \tag{4.6}$$

де зліва від кожної вертикальної риски змінна, що оптимізує функціонал «свого» рівня, праворуч – результат умовної оптимізації на нижніх рівнях. Оптимізаційна задача кожного рівня піддається строгій формалізації, що дозволяє інтенсифікувати процес пошуку умовного екстремуму. Проблема розмірності знімається, але залишається проблема ефективності вирішення (4.6). Щоб процедура (4.6) давала рішення, близьке до абсолютного екстремуму головного функціонала Λ , необхідно забезпечити непротиворічність критеріїв $\Lambda, I, \dots, J_{ii}$. Критерії $\Lambda, I, \dots, J_{ii}$ абсолютно узгоджені, якщо композиція умовних рішень (4.6) призводить до глобального екстремуму головного показника Λ . Два сусідніх за рівнями функціонала локально несуперечливі, якщо їх варіації подібні в обмеженій області G простору змінних підсистеми нижнього рівня:

$$\left. \begin{aligned} \delta\Lambda(u + \delta u) &= k_1 \delta I(u + \delta u); \\ \delta I(\beta + \delta\beta) &= k_2 \delta J(\beta + \delta\beta); \\ \delta J(\beta_{\delta} + \delta\beta_{\delta}) &= k_3 \delta J_{\delta}(\beta_{\delta} + \delta\beta_{\delta}); \\ \delta J_{\delta}(\beta_{i\bar{i}} + \delta\beta_{i\bar{i}}) &= k_4 \delta J_{i\bar{i}}(\beta_{i\bar{i}} + \delta\beta_{i\bar{i}}). \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

Якщо перетин областей G_i існування змінних i -х рівнів представляє не порожню множину, яка включає точку, що визначає глобальний екстремум за Λ , то їх багаторазова послідовна оптимізація від $J_{\text{пп}}$ до Λ та назад від Λ до $J_{\text{пп}}$ в принципі дозволяє відшукати глобальний екстремум Λ . Проте досягти його не просто. Пояснюється це тим, що оптимально будувати функціонали зверху вниз неможливо через незнання оптимальних по верхньому функціоналу значень елементів нижніх рівнів. Так, не можна синтезувати функціонал I управління u на об'єкті Σ_{∞} не знаючи якою математичною моделлю (Σ, β) він буде описаний, який рівень і вид шумів ϵ в оцінках X_m , отриманих за оцінками підсистеми фільтрації і т. д.

Доцільним є наступний алгоритм побудови локально несуперечливих функціоналів:

1. На підставі апріорної інформації про Σ_{∞} (СА) головний функціонал Λ (якість і вартість зерна) і наявних елементах підсистем усіх рівнів, з урахуванням принципу раціонального ускладнення [84] на першому кроці багаторівневого РП приймають найпростіші, що задовольняють апріорно відомим даним, підсистеми первинних перетворювачів оцінювання сигналів X і моделі (Σ, β) і оптимального управління u .

2. Вибрані підсистеми i -го рівня оптимізують методом перебору структур і методів оптимізації за апріорно прийнятим критерієм підсистем $i + 1$ -го рівня: $\Sigma_{i\bar{i}}$ по J_{ϕ} , $(\Sigma_{\phi}, OptJ_{\phi})$ по J , $(\Sigma, OptJ)$ по I , $(Opt I)$ по Λ . Оскільки розмірності цих змінних невеликі, то витрати на пошук допустимі. У результаті цієї оптимізації отримаємо оптимальну систему першого наближення.

3. Методами теорії чутливості, або моделювання і планування експерименту [68], проектують несуперечливі критерії Λ I , J , J_{ϕ} , $J_{\text{пп}}$.

При побудові функціонала I будемо прагнути, щоб аргументи екстремумів Λ та I співпали, а другі варіації були подібні. Для скорочення варіантів доцільно застосовувати оптимальні плани експерименту [68, 84, 85]. Якщо координати екстремуму функціоналу невідомі, то оптимальним експериментом, з метою побудови квадратичної моделі:

$$y(x) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \alpha_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} x_i^2 \quad (4.8)$$

буде центральний композиційний план Бокса [84]. Цей план можливо зробити ортогональним. Нормовані змінні моделі (4.8) приймають п'ять значень $-0, +1, -1, +\alpha, -\alpha$. План експерименту містить:

- 1) повний факторний – експеримент 2^n або дрібні репліки (якщо $n \gg 5$);
- 2) «зірковий план»;
- 3) точку в центрі плану (всього N експериментів).

Для побудови ортогонального плану модель (4.8) перетворюють до виду

$$y(x) = b_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \tilde{x}_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \alpha_{ij} \tilde{x}_i \tilde{x}_j + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} \tilde{x}_i^2, \quad (4.9)$$

де

$$b_0 = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} x_i^2, \tilde{x}_i^2 = x_i^2 - c, c = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_i^2(k),$$

де k – номер дослідження.

Нові змінні \tilde{x}_i^2 будуть зміщуватися на значення $-c$. Це дасть змогу підібрати α так, щоб усі стовпці матриці експерименту були попарно ортогональні. Наприклад, для $n = 3$ та моделі (4.8) матриця плану Боксу подана в табл. 4.2, де $c = (1/15)$

$$\sum_{k=1}^{15} x_i^2(k) = (8 + 2\alpha^2)/15 \quad \text{для будь-якого } i.$$

Матриця плану оптимального експерименту по визначенню моделі (4.8)
функціоналів (4.7)

Вид плану	Нормовані змінні $X(k)$										
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	\tilde{x}_1^2	\tilde{x}_2^2	\tilde{x}_3^2	$y(k)$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	$1-c$	$1-c$	$1-c$	$y(1)$
	1	1	-1	-1	-1	-1	1	$1-c$	$1-c$	$1-c$	$y(2)$
	1	-1	1	-1	-1	1	-1	$1-c$	$1-c$	$1-c$	$y(3)$
	1	1	1	-1	1	-1	-1	$1-c$	$1-c$	$1-c$	$y(4)$
	1	-1	-1	1	1	-1	-1	$1-c$	$1-c$	$1-c$	$y(5)$
	1	1	-1	1	-1	1	-1	$1-c$	$1-c$	$1-c$	$y(6)$
	1	-1	1	1	-1	-1	1	$1-c$	$1-c$	$1-c$	$y(7)$
	1	1	1	1	1	1	1	$1-c$	$1-c$	$1-c$	$y(8)$
2	1	$-\alpha$	0	0	0	0	0	α^2-c	$-c$	$-c$	$y(9)$
	1	α	0	0	0	0	0	α^2-c	$-c$	$-c$	$y(10)$
	1	0	$-\alpha$	0	0	0	0	$-c$	α^2-c	$-c$	$y(11)$
	1	0	α	0	0	0	0	$-c$	α^2-c	$-c$	$y(12)$
	1	0	0	$-\alpha$	0	0	0	$-c$	$-c$	α^2-c	$y(13)$
	1	0	0	α	0	0	0	$-c$	$-c$	α^2-c	$y(14)$
	1	0	0	0	0	0	0	$-c$	$-c$	$-c$	$y(15)$

«Зоряне плече» α підбирають згідно з табл. 4.2 за умови ортогональності \tilde{x}_i^2

$$\sum_{k=1}^N \tilde{x}_i^2(k) \tilde{x}_j^2(k) = 8(1-c)^2 - 4c(\alpha^2 - c) + 3c^2 = 0.$$

Підставивши сюди вирази для c , отримаємо $\alpha = \sqrt{30} - 4 \approx 1,5$, $\tilde{n} \approx 0,83$. Унаслідок взаємної ортогональності коефіцієнти $b_0, \alpha_i, \alpha_{ij}, \alpha_{jj}$ моделі (4.9) визначають за методом найменших квадратів. Від цих коефіцієнтів легко перейти до коефіцієнтів моделі (4.8), а від неї до моделі з ненормованими змінними. Для цього α_j – ділять на модуль кроку варіювання i -ї змінної, α_{ij} – на добуток цих модулів j -ї та i -ї змінної, $i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}, i = j$. За наявності моделей функціоналів підсистем верхнього і нижнього рівнів, нижній конструюють по верхньому шляхом варіювання структури і параметрів нижньої підсистеми за умови мінімуму додаткового функціонала різниці коефіцієнтів $\alpha_i, \alpha_{ij}, \alpha_{ii}$ моделей (4.8) двох рівнів. Узгодивши критерії підсистем усіх рівнів та оптимізувавши їх, одержимо оптимальну систему другого наближення. Повторивши для неї процедуру узгодження критеріїв і

оптимізувавши їх, отримаємо третє наближення. Процес узгодження припиняється, якщо результати подальших ітерацій мало відрізняються. Забезпечення несуперечності критеріїв теоретичним або імітаційним моделюванням на ЕОМ певною мірою наблизить задачу умовної оптимізації СА до задачі визначення глобального екстремуму головного критерію Λ (якості і вартості зерна).

4.5. Композиція підсистем багаторівневої системи СА

Третім, завершальним, етапом розробки близьких до оптимальних по головному показнику Λ структури і алгоритмів функціонування багаторівневої системи оптимізації СА є етап композиції окремих підсистем в єдиний комплекс.

Основні підходи до проблеми композиції:

- упорядкування елементів множин моделей і методів оптимізації;
- вибір оптимальної системи першого наближення;
- організація процесів ускладнення і вдосконалення окремих елементів систем і, можливо, структури самої системи, починаючи з оптимальної системи першого наближення і закінчуючи оптимальною за Λ .

Упорядкування елементів підсистем реалізується проекторами ПР, звужуючими на першому кроці початкову множину елементів до підмножин допустимих, а потім до підмножини претендентів на оптимальні елементи. На першому рівні проектори ПР₁ виділяють ті елементи (методи і моделі), які можуть бути застосовані в цій ситуації, яка визначається сигналами \hat{u}, \hat{x} , що спостерігаються, і заданими критеріями J_ϕ, J, I, Λ . Проектори ПР₁ є багатовимірними дискримінаторами, що пропускають на вихід ті елементи, властивості яких повністю узгоджуються з факторами, що визначають реальну ситуацію. На другому рівні проектори ПР₂ виділяють два–три претенденти на оптимальність. Для цього в проекторі ПР₂ для кожного елемента закладено регресійні залежності відповідних критеріїв від кількісно розрахованого вектора факторів θ , який характеризує конкретну ситуацію.

Для елементів–методів $\{Opt, \alpha\}$ лінійного оцінювання чинниками є співвідношення сигнал–шум за амплітудою і шириною спектрів, корельованість сигналів, наближеність моделі (величина кінцевої похибки апроксимації) та ін.

Визначивши в просторі цих факторів кілька найбільш характерних для практики регресійного аналізу областей, далі для кожної області будують регресійну залежність відповідного критерію $J_{\phi, \dots, \Lambda}$ або його оцінки $\hat{J}_{\phi, \dots, \hat{\Lambda}}$ від θ . Тоді проектор PP_1 визначає область, а PP_2 – для кожного елементу значення критерію для конкретного θ , що належить цій області. Задача побудови проекторів відноситься до етапу проектування і вимагає тим більших витрат, чим точніше проектори і ширше області та розмірності факторів θ .

Розглянемо варіант структури підсистеми ідентифікації в багаторівневій системі оптимізації головного показника Λ (якщо Σ^* і Opt^* апріорно невідомі).

З табл. 4.1 приймаємо структуру БАСІ. Для неї характерна замкненість по основному (для неї) критерію I (точність стабілізації вологості і температури зерна в СА) і неединичність елементу Σ , Opt .

Складемо функціональну схему БАСІ, визначивши її взаємозв'язок з підсистемами верхніх і нижніх рівнів (рис. 4.3).

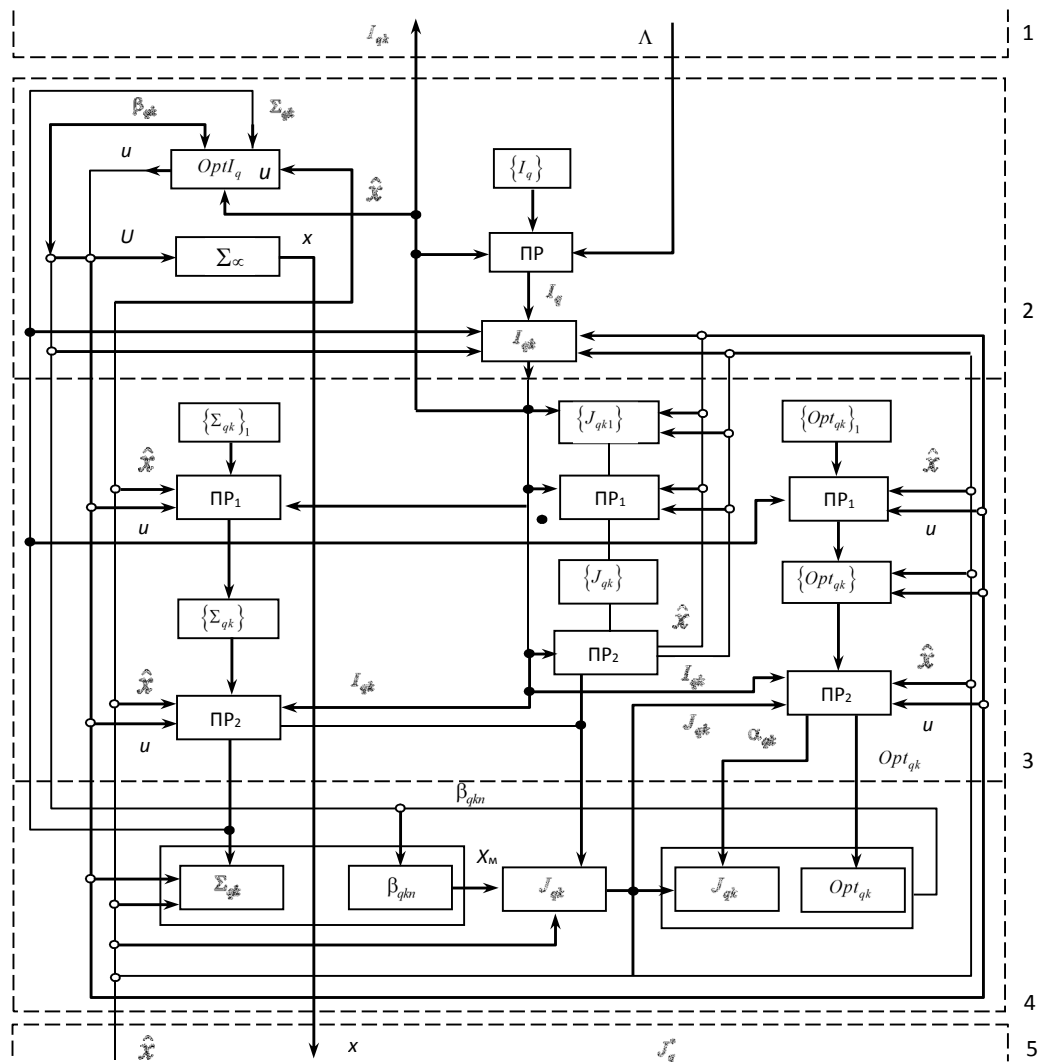


Рис. 4.3. Функціональна схема багатократно адаптивної підсистеми ідентифікації

Характерні частини системи (підсистеми) обведено пунктиром і пронумеровано: 1 – оптимізація Λ ; 2 – оптимізація I ; 3 – оптимізація J , що доповнює найпростішу систему ідентифікації (частина 4) до багатократно адаптивної (частини 3 і 4); 5 – оптимізація J_{ϕ} .

Частина 4 системи містить функціонал J_{qk} , який задається вище, модель Σ_{qk} з вектором β_{qkn} , параметрів, що налаштовуються, оптимізатор (Opt_{qk}, α_{qk}) . Тут реалізується РП $\{\beta_{qkn}\}$, $n = 1, 2, \dots$, щодо J_{qk} за допомогою оптимізатора Opt_{qk}, α_{qk} . Після закінчення РП інформація про оптимальні за J_{qk} структурі Σ_{qk} і векторі β_{qk} параметрів моделі надходить у підсистеми верхніх рівнів.

Частина 3 містить три множини $\{\Sigma_{qk1}\}$, $\{Opt_{qk1}\}$, $\{J_{qk1}\}$; проектори першого рівня PP_1 , що звужують ці множини до підмножин $\{\Sigma_{qk}\}$, $\{Opt_{qk}\}$, $\{J_{qk}\}$ допустимих елементів; проектори PP_2 другого рівня, що вибирають з числа допустимих претенденти на оптимальні елементи. Для конкретного виду I_q і потрібного значення I_{qk} , що задається вище, проектори PP_1 , PP_2 задають елементи $J_{ql}, \Sigma_{ql}, Opt_{ql}, \alpha_{ql}$ частини 4, де в результаті РП $\{\beta_{qkn}\}$ отримують оптимальна по J_{qk} модель $(\Sigma_{qk}, \beta_{qk})$. У підсистемі частини 2 на реальному об'єкті Σ_∞ або його моделі $(\Sigma_{qk}, \beta_{qk})$ оцінюється значення критерію I_{qk} для k -ї структури БАСІ, і якщо воно не задовольняє необхідному, то в одному з проекторів PP_2 відбувається зміна претендента. Знову повторюється процес $\{\beta_{qkn}\}$ і так до виконання умови, що I_{qk} буде не гірше необхідного, або до закінчення процесу перебору всіх претендентів. При зміні I_{qk} в частинах 4 та 5 можливі зміни структури і параметрів підсистеми нижнього рівня. У частинах 3 та 4 має місце композиція двох РП $\{\beta_{qkn}\}$ по n і $\{I_{qk}\}$ по k , що відповідає визначенню БАСІ.

Частина 2 містить реальний СА Σ_∞ , його оптимізатор $Opt_u I_q$, множину $\{I_{qk}\}$ і проектор PP , що визначає (на основі значень I_{qk} і Λ) вид I_q критерію I_{qk} . Сигнал x з виходу об'єкта Σ_∞ надходить в підсистему нижнього рівня, з виходу якої його оцінка \hat{x} потрапляє в системи ідентифікації і управління. Оптимізатор $Opt_u I_{qk}$ на основі інформації $\Sigma_{ql}, \beta_{ql}, I_{ql}, \hat{x}$ виробляє керуючий вплив u , що надходить на об'єкт або його модель (на стадії пошуку оптимальних елементів системи).

Якщо після закінчення РП $\{\beta_{qk}\}$ по k оптимальне значення I_q не задовольняє систему (рис. 4.3) частини 1, то з системи верхнього рівня може надійти команда в проектор ПР на зміну по q виду функціоналу I_q . Крок по q призводить до повторення кроків по k , а k по n в БАСІ, тобто в частинах 1–4 має місце композиція з трьох РП, що відповідає визначенню системи, яка самоорганізується (СС) (табл. 4.1).

Глибокий зворотній зв'язок за критеріями від Λ до I , від I до J , від J до J_Φ , оптимізуючий і цілеорієнтуєчий структуру і параметри підсистеми всіх рівнів, здійснює регуляризацию рішення в широкому сенсі. Як показано далі, в процесі оптимізації методів ідентифікації здійснено перехід від найпростішого МНК до ІМНК, від різних фільтрів не цілеорієнтованих на I , до цілеорієнтованих на I і т. д.

4.6 Ідентифікація динаміки процесу сушіння зерна в секції мінізерносушарки

4.6.1. Загальні положення

За минуле століття відбувся суттєвий розвиток методів і засобів ідентифікації від простих наближених ручних до більш складних і точних, які використовують сучасні автоматизовані системи збору і обробки даних (АСОД) з використанням потужних ЕОМ і інтелектуальних первинних перетворювачів (датчиків) [68, 84, 85]. Це дозволило значно підвищити частоту опитування датчиків, швидкість і точність обробки інформації, збільшити інформативність даних на обмежених у часі вибірках. Однак, природні властивості реальних об'єктів (не автономність, не стаціонарність, не лінійність взаємозв'язків змінних стану, нескінченно мірність і т. ін.) не дають можливості будувати моделі, абсолютно ідентичні реальному об'єкту. Найдосконаліша АСОД має можливість спостерігати тільки за обмеженою множиною змінних стану $X(t)$ об'єкта. Будь-яка модель лише наближено

відображає взаємозв'язок компонентів $x_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, n -мірної вектор функції $X(t)$, та m -мірною вектор-функції $U(t)$ вхідних впливів:

$$\dot{X}^*(t) = f(X^*(t), U^*(t), t), \quad (4.10)$$

де $\dot{X}^*(t)$ – вектор швидкості зміни $X^*(t)$.

За обмежених відхилень ΔX^* , ΔU^* від базового режиму (X_0, U_0) та наявності природної гладкості відображення f , модель (4.10) можна подати з допустимою похибкою $\varepsilon^*(t)$ лінійною стаціонарною:

$$\Delta \dot{X}^*(t) = A_0 X^*(t) + B_0 U^*(t) + \varepsilon^*(t), \quad (4.11)$$

або її скалярним представленням:

$$\Delta \dot{x}_i^*(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} \Delta x_j^*(t) + \sum_{k=1}^m b_{ik} \Delta U_k^*(t) + \varepsilon_i^*(t), \quad i = \overline{1, n} \quad (4.12)$$

Задача параметричної ідентифікації полягає у визначенні оцінок \hat{a}_{ij} , \hat{b}_{ik} коефіцієнтів a_{ij} , b_{ik} за умови мінімуму функціоналу I_i похибки $\varepsilon_i^*(t)$. Логічно в якості I_i взяти середній на інтервалі T спостереження квадрат похибки $\varepsilon_i^*(t)$, де в (4.10), (4.11), (4.12) фігурують точні значення відповідних змінних. Тоді в якості найкращої моделі (4.11) і, відповідно, оцінок \hat{A} , \hat{B} буде та, коефіцієнти a_{ij} , b_{ik} якої обчислено по МНК для точних даних $\dot{X}^*(t)$, $X^*(t)$, $U^*(t)$. Якщо є можливість безпосередньо вимірювати чи обчислювати $\dot{X}^*(t)$, то формально динамічні моделі (4.11), (4.12) можна подати як регресійні. Так i -ий рядок системи (4.11) подамо у вигляді:

$$y^*(k) = \sum_{i=1}^{n+m} \beta_i x_i^*(k) + \varepsilon^*(k), \quad (4.13)$$

де $y^*(k) = \Delta \dot{x}_i^*(k)$, $x_i^*(k)$ включає множину $\Delta x_j^*(k)$, $\Delta U_k^*(k)$, β_i включає a_{ij} , b_{ik} в рівнянні (3), k – номер дискети t_k часу t , $k = \overline{1, m}$.

Таким чином, теоретично найкращою оцінкою вектора β параметрів a_{ij} , b_{ik} буде МНК – оцінка [84] за умови точного вимірювання змінних:

$$\hat{\beta}^* = \left((X^*)^T X^* \right)^{-1} (X^*)^T Y^* \quad (4.14)$$

Завдання полягає в побудові такого методу параметричної ідентифікації, який би в реальних умовах зашумленості вимірів змінних $X^*(t), Y^*(t)$ об'єкта давав оцінку $\hat{\beta}$, близьку до МНК – оцінки (4.14) для точних даних.

4.6.2. Ефект зміщення і регуляризація МНК – оцінок в реальних умовах

На практиці МНК– оцінку доводиться отримувати за вимірами, збуреними випадковими перешкодами N_x і N_y :

$$X = X^* + N_x; \quad Y = Y^* + N_y. \quad (4.15)$$

МНК – оцінка $\hat{\beta}$ вектора β^* для реальних даних (4.15):

$$\hat{\beta} = (X^T X) X^T Y = C Y, \quad C = (X^T X) X^T \quad (4.16)$$

Покладемо, що перешкоди N_x і N_y – гаусівські білі взаємонекорельовані шуми і розрахуємо зсув $\Delta\beta$ оцінки (4.16) відносно точного значення (4.14):

$$\begin{aligned} \Delta\beta &= M\{\hat{\beta}\} - \beta^* = M\{[C^* + \delta C(N)][Y^* + \varepsilon^* + N_y]\} - \beta^* = \\ &= M\{[C^* + \delta C(N)]Y^*\} - \beta^* = [X^{*T}X^* + M\{N_x^T N_x\}]^{-1} X^{*T}Y^* - \beta^* = \\ &= [X^{*T}X^* + \text{diag}\sigma_i^2 I]^{-1} X^{*T}Y^* - \beta^*. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Введемо позначення:

$$X^{*T}X^* = A^*, \quad M\{N_x^T N_x\} = \delta A, \quad X^{*T}Y^* = B^* = M\{X^T Y\} = B.$$

Тоді $(A^*)^{-1} B^* = \hat{\beta}^*$, $[A^* + \delta A]\hat{\beta} = B^*$, звідси $\delta A \hat{\beta} = -A^* (\hat{\beta} - \hat{\beta}^*) = -A^* \Delta\hat{\beta}$, тобто $\delta A (\hat{\beta}^* + \Delta\hat{\beta}) = -A^* \Delta\hat{\beta}$,

або

$$\Delta\hat{\beta} = -(A^* + \delta A)^{-1} \delta A \hat{\beta}^*. \quad (4.18)$$

Оцінку (4.16) $\hat{\beta}$ занижено відносно істинної β^* на величину (4.18). За умови, що норма $\|\delta A\| \rightarrow 0$, $\hat{\beta}$ прямує до $\hat{\beta}^*$, $\Delta\hat{\beta} \rightarrow 0$; за умови $\|\delta A\| \rightarrow \infty$ оцінка $\hat{\beta}$ прямує до нуля, а $\Delta\hat{\beta}$ до $-\hat{\beta}^*$. Коваріація оцінки (4.16) за наведених вище умов та приймаючи, що норма $\|N_x^T \varepsilon\|$ набагато менша, ніж $\|X^{*T}\|$ або $\|N_x^T Y^*\|$, наближено дорівнює [84]:

$$\begin{aligned} \text{cov}[\hat{\beta}] &\cong M\{[\tilde{N}_1 \varepsilon + C_2 N_\delta][\tilde{N}_1 \varepsilon + C_2 N_x]^T\} = \\ &= \tilde{N}_1 I \{\varepsilon \varepsilon^T\} \tilde{N}_1^T + \tilde{N}_2 M\{N_x N_x^T\} C_2^T, \end{aligned} \quad (4.19)$$

де $\varepsilon = \varepsilon^* + N_y$, $C_1 = [X^{*\top} X^* + M\{N_x N_x^\top\}]^{-1} X^{*\top}$, $C_2 = [X^{*\top} X^* + M\{N_x N_x^\top\}]^{-1} Y^{*\top}$.

Перша складова виразу зі зростанням N_x зменшується, в другій C_2 зменшується, а $M\{N_x N_x^\top\}$ збільшується. Але C_2 входить до виразу (4.19) квадратично, тоді як $M\{N_x N_x^\top\}$ – лінійно. Тому для білого шуму, якщо $M\{N_x N_x^\top\} = \sigma_{N_x}^2 \cdot m$, зі зростанням $\sigma_{N_x}^2$ коваріація оцінки $\hat{\beta}$ зменшуватиметься. Таким чином МНК має властивість регуляризації, подібно до регуляризації за Тихоновим [84]. Остання полягає в мінімізації функціонала:

$$I = \varepsilon^\circ \varepsilon = (Y - X^*)^\top (Y - X^*) + \alpha \hat{\beta}^\top \hat{\beta} \quad (4.20)$$

де α – параметр регуляризації.

З необхідної умови мінімуму виразу (4.20),

$$\frac{\partial I}{\partial \hat{\beta}} = 0 = 2(X^{*\top} X^* \hat{\beta} - X^{*\top} Y + \alpha \hat{\beta}) \quad (4.21)$$

отримаємо занижену по нормі $\|\hat{\beta}\|$, але регуляризовану МНК – оцінку:

$$\hat{\beta} = (X^{*\top} X^* + \alpha I)^{-1} X^{*\top} Y \quad (4.22)$$

Зіставляючи (4.17) і (4.22), бачимо, що в МНК параметр α дорівнює $\text{diag } \sigma_\varepsilon^2 \cdot m$. Слід вказати ще на один недолік МНК. МНК–оцінки (4.16) знаходяться як координата точки мінімуму функціоналу $\varepsilon^\top \varepsilon$. Оскільки функціонал є усередненим на кінцевому інтервалі T значенням квадрата ε , яке є сумішшю корисного сигналу $Y^* - X^* \beta$ і випадковою збурення $N_y - N_x \beta$, то він, як функція від β , не є точним. Тому операція диференціювання $\frac{\partial}{\partial \beta} (\varepsilon^\top \varepsilon)$ зашумленої функції $\varepsilon^\top \varepsilon$ є некоректною [84, 85]. Саме цим обумовлено невисоку точність МНК–оцінок на коротких сильно зашумлених вибірках даних Y , навіть за точних X^* .

4.6.3. Метод незміщеного і ефективного оцінювання, який пропонується використовувати в реальних умовах

Отже бажано зменшити розкид значень функціонала I . Це можливо зробити шляхом додаткового усереднення на множині квазістатистично незалежних

функціоналів, близьких до середньоквадратичного для точних даних. Такими функціоналами можуть бути зсунуті у часі t на інтервал θ середні добутки

$\frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon(t) \varepsilon(t+\theta) dt$ [125]. Усреднюючи їх на інтервалі $[-\tau_1, \tau_1]$, отримуємо функціонал:

$$I = \frac{1}{2} \int_{-\tau_2}^{\tau_1} \eta(\theta) \int_0^T \varepsilon(t) \varepsilon(t+\theta) dt d\theta \quad (4.23)$$

де $\eta(\theta)$ – функція ваги.

З необхідної умови мінімуму показника (4.23) по β_k , $k = \overline{1, n}$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial \beta_k} &= \frac{1}{2} \int_{-\tau_1}^{\tau_1} \eta(\theta) \int_0^T \left[\frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial \beta_k} \varepsilon(t+\theta) + \varepsilon(t) \frac{\partial \varepsilon(t+\theta)}{\partial \beta_k} \right] dt d\theta = \\ &= \int_{-\tau_1}^{\tau_1} \eta(\theta) \int_0^T (-x_k(t)) \left[y(t+\theta) - \sum_{i=1}^n \beta_i x_i(t+\theta) \right] + \\ &+ (-x_k(t+\theta)) \left[y(t) - \sum_{i=1}^n \beta_i x_i(t) \right] dt d\theta = 0, \quad k = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (4.24)$$

отримуємо систему рівнянь:

$$A \cdot \hat{\beta} = B, \quad (4.25)$$

де A – матриця $n \times n$ з елементами a_{ik} ; B – матриця–стовпчик $n \times 1$ з елементами b_k :

$$\begin{aligned} a_{ik} &= \sum_{l=-p}^p \eta(l) \sum_{j=1}^M [(x_i(j+l))x_k(j) + x_i(j)x_k(j+l)], \\ b_k &= \sum_{l=-p}^p \eta(l) \sum_{j=1}^M [(y(j+l))x_k(j) + y(j)x_k(j+l)]. \end{aligned}$$

Розв'язок системи (4.25) дає шукану оцінку $\hat{\beta}$:

$$\hat{\beta} = A^{-1} \cdot B. \quad (4.26)$$

Вагову функцію $\eta(m)$ знаходитимемо у класі симетричних відносно $m = 0$ фінітних функцій (таких, що $\eta(0) = \eta(\pm m_{кр}) = 0$). Наприклад:

$$\eta(m) = \eta(m, \gamma, \theta) = (1 + |m|)^\theta (1 - \cos \frac{|\pi \cdot m|}{m_{кр}})^\gamma \quad (4.27)$$

де $\theta \in (\pm \infty)$, $\gamma \in (0, \infty)$, а число $m_{кр}$ визначається за умови

$$\det[X^T (X_{m_{кр}} + X_{-m_{кр}})] \cong 0 \quad (4.28)$$

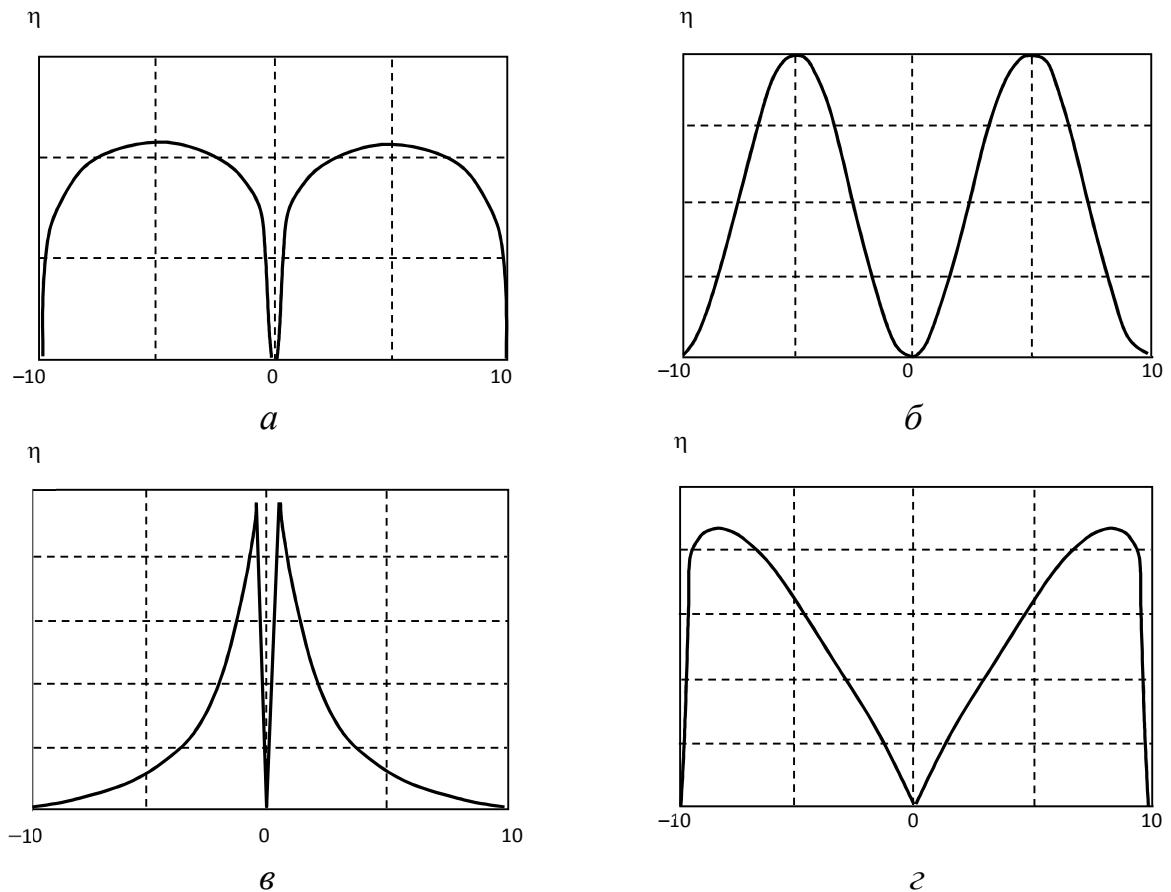


Рис. 4.4. Залежність $\eta(m, \theta, \gamma)$: а – $\theta = 0, \gamma = 0,1$; б – $\theta = 0, \gamma = 1$; в – $\theta = 2, \gamma = 0,1$; г – $\theta = 2, \gamma = 0,1$

Параметри θ і γ оптимізуються за головним (зовнішнім) показником I [84] в системах типу БАСІ (табл. 4.1). Параметр γ впливає на ширину імпульсу $\eta^{(m)}$, а θ – на його асиметрію відносно максимуму (рис. 4.4). Теоретичний аналіз незміщеності і ефективності оцінок $\hat{\beta}$ (4.25) наведено в [84], числовий аналіз розглянуто далі на конкретному прикладі визначення коефіцієнтів передаточних функцій W_{ij} (рис. 3.24) сушильної камери зерносушарки.

4.6.4 Співставлення роботи МНК і запропонованого методу в умовах наближених до реальних

Для дослідження роботи методу ІМНК, запропонованого для ідентифікації параметрів передавальних функцій виконавчого механізму і об'єкта сушіння зерна, використано модель в середовищі *Simulink* [130-134], представлену на рис. 4.5.

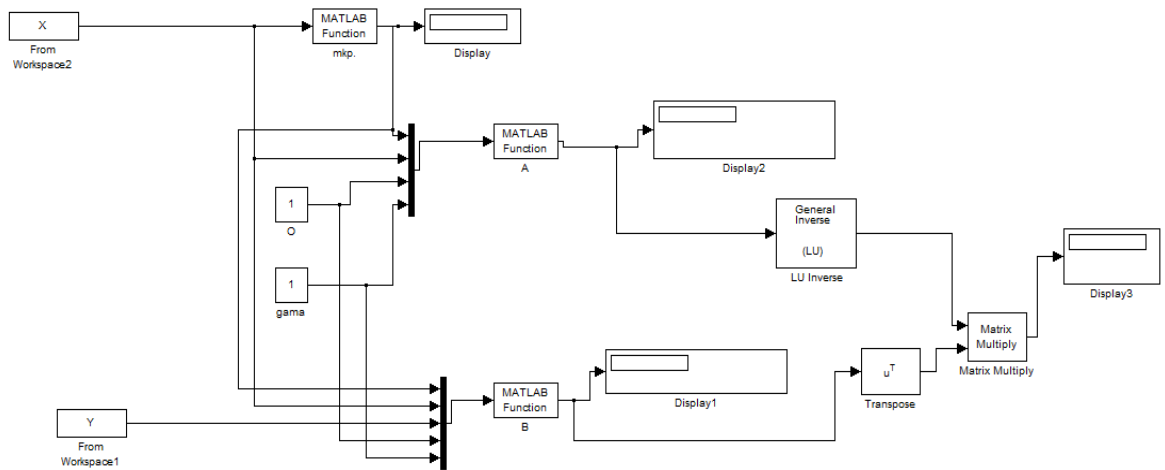


Рис. 4.5. Модель методу ІМНК

Блоки m_{kr} , A та B містять функції описані в середовищі Matlab, відповідно m_{kr} , $calcA$ та $calcB$.

Код функції m_{kr} , яка обчислює m критичне:

```
function mkr=mkr(X)
```

```
%Uобчислює mkr
```

```
f=size(X,2);
```

```
A1=calcA1(X,1);
```

```
A1=normA(A1);
```

```
dA1=det(A1);
```

```
m=2;
```

```
A=calcA1(X,m);
```

```
A=normA(A);
```

```
dA=(det(A));
```

```
while floor(dA*1000000000)~=floor(dA1*1000000000)&(m<f/2-1)
```

```
    m=m+1;
```

```
    A=calcA1(X,m);
```

```
    A=normA(A);
```

```
    dA=det(A);
```

```
end;
```

```
mkr=m;
```


end

Код функції calcA, яка обчислює елементи матриці A, за формулою (4.13):

```
function A =calcA(m, X,O,gama)
% obchuslennja matrix A
f = size(X, 1); % число строк
t=size(X,2); %число столбцов
for i=1:1:f
    for j=1:1:f
        zagal=0;
        chast=0;
        for k=m+1:1:t-m
            for l=-m:1:m
                n=(1+abs(l))^O*(1-cos(2*pi*abs(l)/m))^gama;
                aij=X(i,k)*X(j,k+1)+X(i,k+1)*X(j,k);
                chast=chast+aij*n;
            end;
            zagal=zagal+chast;
        end;
        A(i,j)=zagal;
    end;
end;
end
```

Код функції calcB, яка обчислює елементи матриці B за формулою (5):

```
function B =calcB(m, X, Y,O,gama)
% obchuslennja matrix A
f = size(Y, 1); % число строк
```

```

h=size(X,1) ;
t=size(X,2); %число столбцов
for i=1:1:f
    for j=1:1:h
        zagal=0;
        chast=0;
        for k=m+1:1:t-m
            for l=-m:1:m
                n=(1+abs(l))^O*(1-cos(2*pi*abs(l)/m))^gama;
                aij=Y(i,k+l)*X(j,k)+Y(i,k)*X(j,k+l);
                chast=chast+aij*n;
            end;
            zagal=zagal+chast;
        end;
        B(i,j)=zagal;
    end;
end;
end.

```

На якість параметричного оцінювання впливає обумовленість $x^T x$, яка залежить від ступеня взаємоз'язку змінних $x_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, а не їх кількості. Тому обмежимося простим тестом:

$$y^*(k) = \beta_1 * x_1^*(k) + \beta_2 * x_2^*(k); \quad k = \overline{1, 1000}.$$

$$x_1^* = \omega^*, \quad x_2^* = x^*, \quad \beta_1^* = \beta_2^* = 1$$

На виміри $y(k)$, $x_1(k)$, $x_2(k)$ накладено модель білого шуму – випадкові числа з рівномірним розподілом в діапазоні $[\pm 1]$. Для об'єктивного оцінювання зміщення і розкиду оцінок $\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ відносно істинних β_1, β_2 згенеровано 10 статистично

незалежних реалізацій шумів. Результати ідентифікації коефіцієнтів β_1, β_2 по МНК та запропонованим методом наведено в табл. 4.3. Внаслідок дії шумів оцінки β_1 і β_2 по МНК (табл. 4.3) занижено майже на 50% (4.18). Проте має місце регуляризація (4.22): розкид σ_{β_i} оцінок β_i складає 0,02 і 0,05. В запропонованому методі (табл. 4.3) оцінки майже не зміщені: 1,005 і 0,943, але розкид більший, ніж у регуляризованому МНК (0,15; 0,16). Зменшення розкиду можливе за рахунок компромісу між зміщенням і розкидом шляхом оптимізації параметрів θ і γ вагової функції $\eta(\theta)$ за головним показником I (табл. 4.1). У випадку шуму тільки у вихідній змінній (табл. 4.4) (ідеальна ситуація для МНК) оцінки незміщені, але розкид оцінок по МНК (0,07 і 0,09) більший розкиду (0,05 і 0,08) оцінок запропонованим методом без оптимізації параметрів функції $\eta(m)$. У випадку, якщо є можливість оптимізації $\eta(m)$ [84], виграш запропонованого методу у сенсі незміщеності і ефективності оцінок відносно МНК буде суттєво більшим.

Таблиця 4.3

Результати оцінювання у випадку зашумленості $x(t)$ і $y(t)$ білим шумом

№	МНК – оцінювання		Оцінювання запропонованим методом	
	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$
1	0,4790	0,4981	1,0282	0,9094
2	0,4607	0,4493	1,0179	0,8844
3	0,4843	0,5663	1,0916	0,8435
4	0,5024	0,5401	1,0020	0,9290
5	0,5246	0,4659	1,0313	0,9798
6	0,4997	0,5058	1,2904	0,7437
7	0,4849	0,5255	0,7093	1,2307
8	0,4919	0,4431	0,8283	1,1910
9	0,4676	0,4856	1,0825	0,7197
10	0,4642	0,6015	0,9653	1,0112

$\bar{\beta}$	0,4860	0,5082	1,0047	0,943
$\sigma_{\beta_i}^2$	0,00038	0,0026	0,0241	0,0283
σ_{β_i}	0,0197	0,0511	0,1551	0,1682

Результати оцінювання параметрів в ситуації зашумленості тільки вихідних змінних запропонованим методом і МНК представлено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Результати оцінювання у випадку зашумленості тільки $y(t)$

№	МНК – оцінювання		Оцінювання запропонованим методом	
	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$
1	0,9781	0,9212	0,9497	1,1019
2	1,0541	0,9371	1,0234	0,8554
3	0,9329	1,0817	0,9825	1,0618
4	1,1181	0,8819	1,0111	0,9132
5	0,9847	1,0327	1,1907	0,9807
6	1,0009	1,0192	1,1018	0,9823
7	1,1549	0,8258	0,9866	1,1244
8	0,9407	1,0765	1,0216	0,9879
9	0,9578	1,0823	0,9639	1,0861
10	1,0007	0,9412	1,0961	0,9946
$\bar{\beta}$	1,0123	0,9800	1,0280	1,0089
$\sigma_{\beta_i}^2$	0,0055	0,0083	0,0027	0,0073
σ_{β_i}	0,0744	0,0911	0,0522	0,0854

Як показали теоретичні [84, 113, 116] і експериментальні розрахунки теста, запропонований метод дозволяє в реальній ситуації зашумлених вимірів вхідних і вихідних сигналів первинних перетворювачів, отримати незміщені оцінки

параметрів, близькі до оцінок по МНК для точних вимірів, а також розкид оцінок, менший розкиду для МНК. Це дає можливість ефективно використовувати його в системах адаптивного керування реальними об'єктами, в нашому випадку у системах стабілізації технологічних параметрів процесу сушіння зерна.

Використання запропонованого методу в підсистемі ідентифікації дозволить точніше визначати W_{ij} і, як наслідок, покращити точність стабілізації температури і вологості зерна, тобто показник I від якого залежить головний показник Λ в системі (рис. 4.3).

4.7 Визначення передаточних функцій “вхід–вихід” експериментальної установки для сушіння зерна

Для визначення передаточних функцій “вхід–вихід” використано дані, отримані під час дослідження роботи експериментального зразка мінізерносушарки (згідно Додатку А), структурна схема якої представлена на рисунку 4.6.

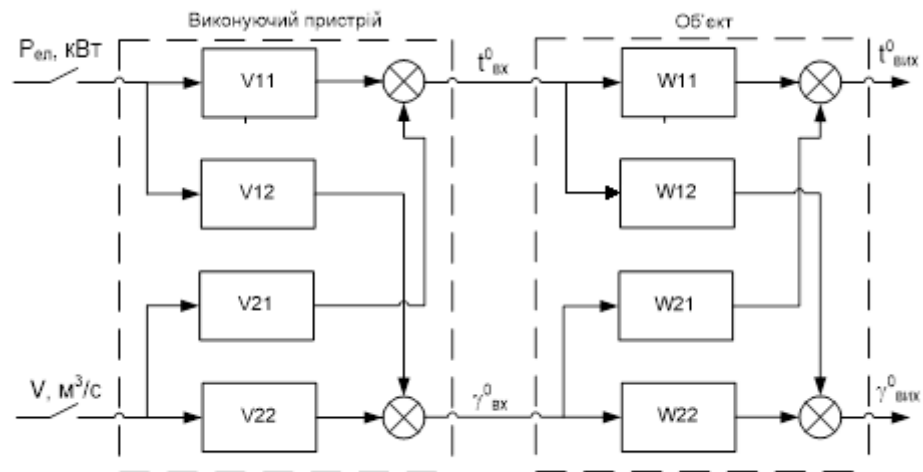


Рис. 4.6. Схема зерносушарки

Ідентифікації підлягають як безпосередньо процеси в сушильному просторі сушарки, так і у виконуючому пристрої нагріву і подачі повітря.

Відповідно до принципу раціонального ускладнення *на першому кроці* релаксаційного процесу (розділ 4.1) методом МНК були отримані статичні коефіцієнти зв'язку відповідних вхідних змінних виконуючого пристрою і об'єкта

(рис. 4.6). Для цього використовувалися ділянки усталених значень приростів відповідних вхідних та вихідних змінних за умови ступінчатої зміни одного з вхідних впливів (потужність $P_{ел}$ нагрівача або швидкість V потоку повітря). Наприклад, для визначення статичного коефіцієнту α_{12} в передаточній функції $V_{12}(p)$ нагрівача визначалася МНК–оцінка $\hat{\alpha}_{12}$ коефіцієнту α_{12} :

$$\hat{\alpha}_{12} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta\gamma_{вх}(i) \cdot P_{ел}(i)}{\sum_{i=1}^N (\Delta P_{ел}(i))^2}. \quad (4.28)$$

Або для перехресної передаточної функції $W_{21}(p)$ об'єкта МНК–оцінка \hat{K}_{21} статичного коефіцієнта K_{21} :

$$\hat{K}_{21} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta t_{вих}(i) \cdot \Delta\gamma_{вх}(i)}{\sum_{i=1}^N (\Delta\gamma_{вх}(i))^2}. \quad (4.29)$$

Знаходження інших статичних коефіцієнтів проводиться аналогічно.

Однак, у формулах (4.28), (4.29) МНК–оцінювання в знаменниках маємо суму квадратів відповідних приростів змінних ($\Delta P_{ел}(i)$, $\Delta\gamma_{вх}(i)$, $i = \overline{1, N}$), які являють собою адитивну суміш корисної складової і випадкового збурення чи похибок вимірювання. Тому МНК–оцінки $\hat{\alpha}_{i,j}$, \hat{K}_{ij} коефіцієнтів α_{ij} , K_{ij} , $i, j = 1, 2$, згідно (4.18) були занижені. За умови, що $N \rightarrow \infty$ їх математичні очікування, наприклад $M\{\hat{K}_{21}\}$ дорівнюють:

$$M\{\hat{K}_{21}\} = \frac{M\{\Delta t_{вих}(i) \cdot \Delta\gamma_{вх}(i)\}}{M\{\Delta\gamma_{вх}^*(i)\}^2 + M\{y(i)\}^2} \quad (4.30)$$

де $\Delta\gamma_{вх}^*(i)$ – точне значення, $y(i)$ – випадкова похибка, близька до “білого шуму”.

Тому на другому кроці РП від МНК було здійснено перехід до запропонованого методу, яким отримаємо незміщені і більш ефективні оцінки відповідних коефіцієнтів, а саме:

$\alpha_{11}=6,7$ (град/Вт); $\alpha_{12}=-0,9$ (% вологості/Вт); $\alpha_{21}=-28$ (град/[м³/с]); $\alpha_{22}=-8,7$ (% вологості/[м³/с]); $K_{11}=0,6$ (град/град); $K_{12}=-0,58$ (% вологості/град); $K_{21}=-0,3$ (град/% вологості); $K_{22}=0,4$ (% вологості/% вологості)

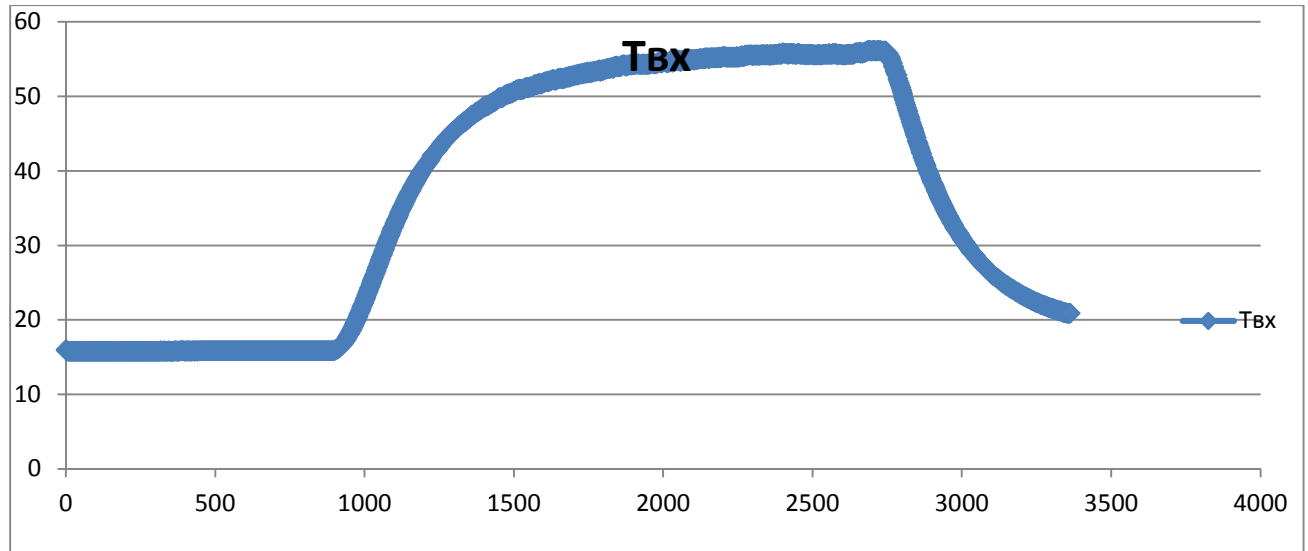
На третьому кроці РП запропонованим методом із динаміки першого наближення (інерційних ланок I порядку) визначалася відповідна стала часу τ .

В загальному представленні рівняння ланки має вигляд:

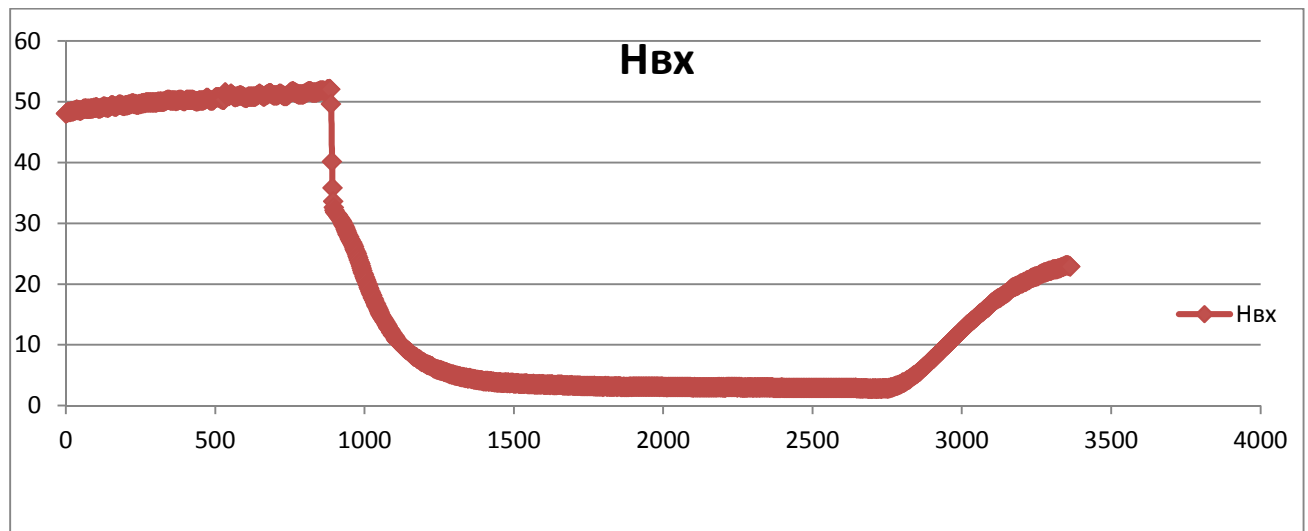
$$\tau \frac{dy}{dt} + y(t) = k \cdot x(t) = x_1(t) \quad (4.31)$$

де $x_1(t) = k \cdot x(t)$ відоме так як коефіцієнт k уже визначено із статички.

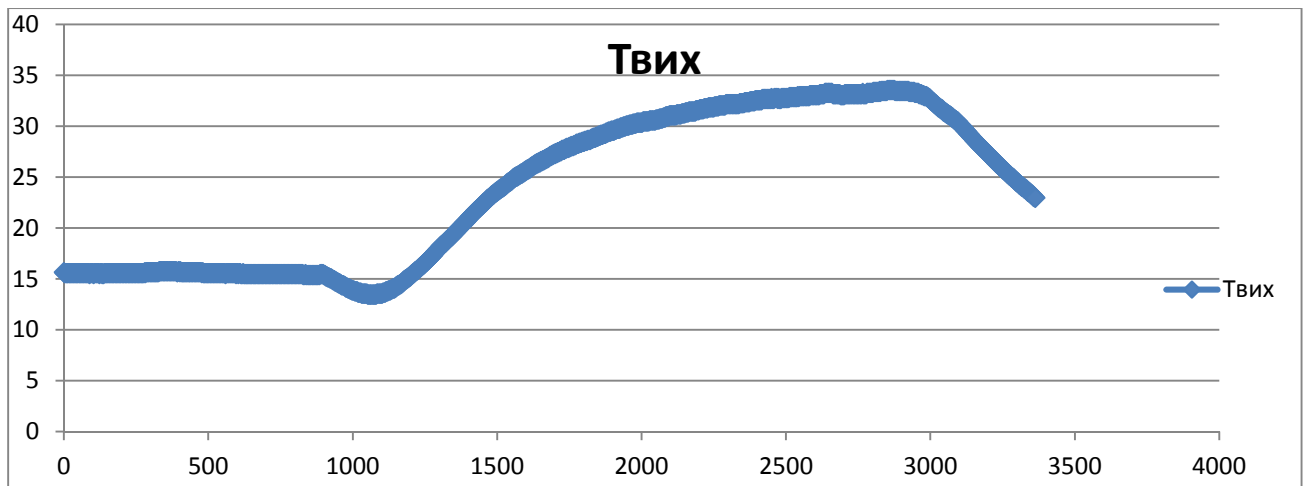
Невідому сталу часу τ визначаємо запропонованим методом із зашумлених випадковими впливами і похибками вимірювання даних динаміки процесів (рис. 4.7 а, б, в, г)



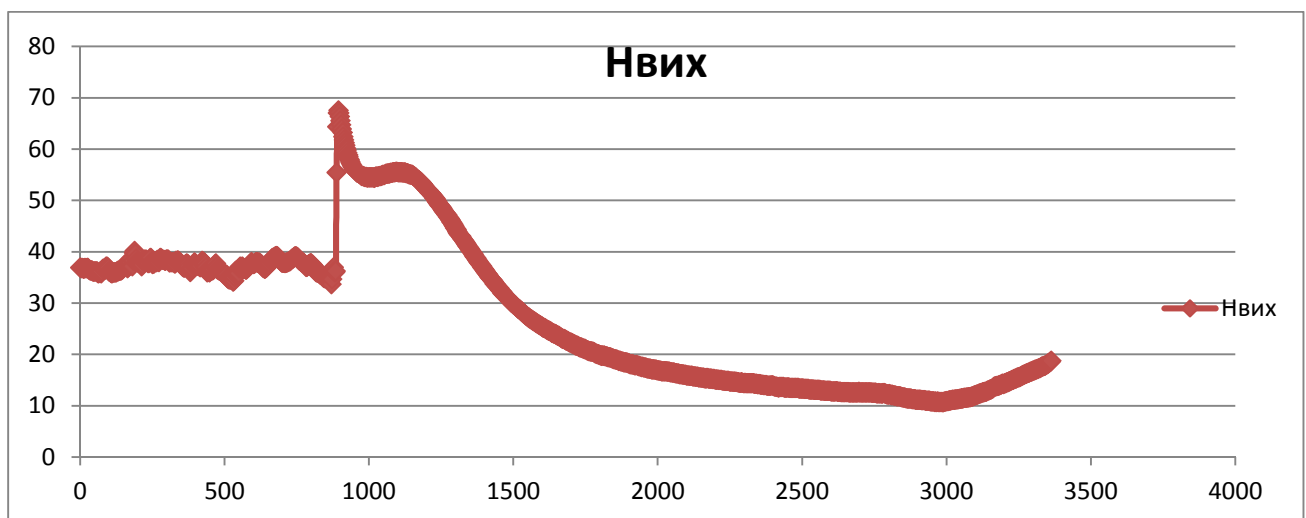
а



б



б



в

Рис. 4.7. Перехідні процеси: *а* – зміни температури теплоносія на вході в сушильну камеру; *б* – зміни вологості теплоносія на вході в сушильну камеру; *в* – зміни температури теплоносія на виході із сушильної камери; *г* – зміни вологості теплоносія на виході із сушильної камери

Для цього від рівняння $\tau \frac{dy}{dt} + y(t) = x_1(t)$ перейдемо до наближеного різницевого еквіваленту:

$$\tau \frac{y(i+1) - y(i)}{\Delta t} + y(i) = x_1(i), \quad (4.32)$$

або

$$y(i+1) = \frac{\Delta t}{\tau} x_1(i) + \frac{(1-\Delta t)}{\tau} y(i), \quad (4.33)$$

де змінні $y(i)$, $y(i+1)$, $x_1(i)$ вимірюються з шумами.

Позначим $\frac{\Delta t}{\tau}$ як β_1 , $\frac{1-\Delta t}{\tau}$ як β_2 , маючи крок Δt на 3 порядки менший за τ , можна прийняти, що $\frac{\beta_1}{\Delta t} \approx \beta_2 = \tau^{-1}$ або $\tau = \left(\frac{\beta_1}{\Delta t} + \beta_2\right) \cdot 0,5$.

Тоді з рівняння

$$y(i + 1) = \beta_1 \cdot x_1(i) + \beta_2 \cdot y(i), \quad (4.34)$$

для $i = \overline{1, N}$, $N \gg 2$ ($N=2000$) запропонованим методом (4.25) в режимі off-line було отримано незміщені оцінки сталих часу τ для кожного із каналів i , як результат, відповідні передаточні функції V_{ij} виконуючого пристрою та W_{ij} об'єкта:

$$V_{11}(p) = \frac{6,7}{490 \cdot p + 1}; \quad V_{12}(p) = \frac{-0,9}{310 \cdot p + 1};$$

$$V_{21}(p) = \frac{-28}{160 \cdot p + 1}; \quad V_{22}(p) = \frac{-8,7}{150 \cdot p + 1};$$

$$W_{11}(p) = \frac{0,6}{380 \cdot p + 1}; \quad W_{12}(p) = \frac{-0,58}{525 \cdot p + 1};$$

$$W_{21}(p) = \frac{-0,3}{337 \cdot p + 1}; \quad W_{22}(p) = \frac{0,4}{390 \cdot p + 1};$$

на основі яких і відповідних структур (рис. 3.18), (рис. 3.24) були розраховані передавальні функції (3.37), (3.38).

В on-line режимі відповідні передаточні функції уточнюються за умови, якщо похибки стабілізації температури і вологості зернової маси в сушарці виходить за допустимі межі:

- при збільшенні температури подають ступеньку потужності нагрівача зі знаком мінус і навпаки;
- при збільшенні вологості подають ступеньку швидкості V потоку вентилятора зі знаком мінус і навпаки.

За записами реакції на ці впливи підсистема ідентифікації уточнює відповідні коефіцієнти і, як наслідок, уточнюються параметри підсистеми розв'язки каналів (діагоналізатора), корегуючих ланок та ПІ-регуляторів, наближаючи динаміку і статику каналів до еталонної.

Загальний вигляд системи керування з підсистемою ідентифікації зображено на рис. 4.8.

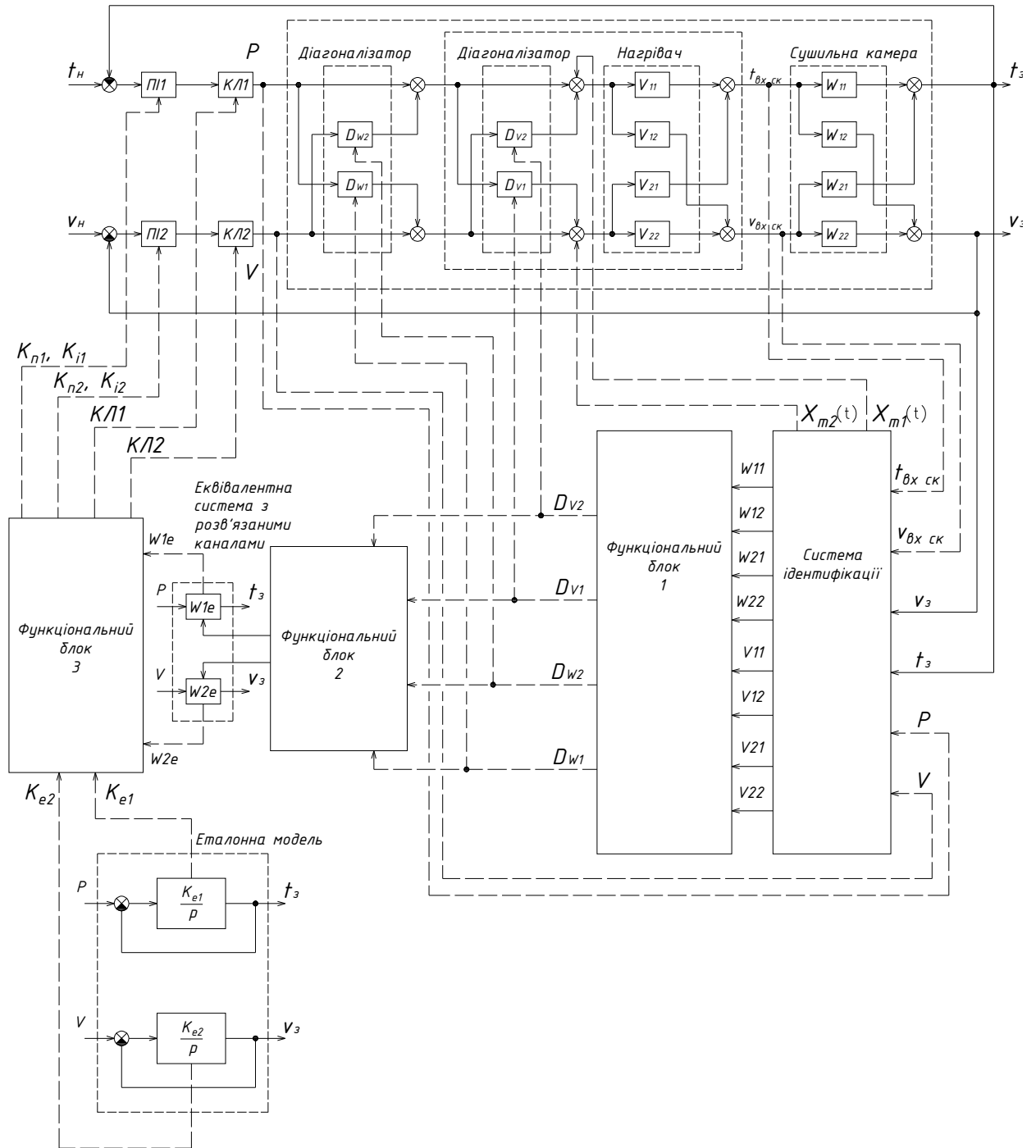


Рис. 4.8. Система автоматизованого керування процесом сушіння зернових культур

Висновки за розділом

1. Використання системного підходу та структури і алгоритмів функціонування багаторазово адаптивної системи ідентифікації (БАСІ, табл. 4.1, рис. 4.1, рис. 4.2) дозволило коректно побудувати підсистему ідентифікації процесів у сушарці.

2. Враховуючи не стандартну для використання метода найменших квадратів реальну ситуацію зашумленості як вихідних, та і вхідних змінних об'єкта ідентифікації, в якості оптимального (в сенсі незміщеності і ефективності оцінок параметрів) був протестований і використаний більш досконалий (ніж МНК) метод мінімізації оптимально взваженої суми симетричних кореляційних функцій (4.23).

3. Отримані незміщені і ефективні оцінки передаточних функцій сушарки дозволили реалізувати оптимальні адаптивні алгоритми автономного керування окремими каналами температури вологості сушарки як багатомірного об'єкта з перехресними зв'язками.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано новий підхід до вирішення проблеми сушіння зернових культур, що полягає у створенні адаптивної оптимальної системи автоматичного керування процесом сушіння, яка дозволяє отримати кондиційне зерно для якісного подальшого зберігання.

1. Із численних методів теплового сушіння найпоширенішим є конвективний, за якого тепла енергія передається зерну від нагрітого газу (повітря або його суміші з продуктами згоряння палива). Те, що нагрітий газ водночас виступає як теплоносіє та вологовбирач, зумовлює відносну простоту конструкцій конвективних сушарок. Показано, що при виборі методів попереднього оброблення та режимів сушіння зерна необхідно враховувати його термо- і вологостійкість, біологічну природу та структурно-механічні властивості, від яких залежить утворення тріщин. Встановлено, що при сушінні попередньо нагрітого зерна поверхневий градієнт вологовмісту менший, ніж при звичайному конвективному сушінні, тобто зона випаровування розташовується поблизу зовнішньої поверхні матеріалу, до якої волога рухається у вигляді рідини. Це запобігає перегріванню поверхні матеріалу та сприяє зберіганню і поліпшенню якості зерна.

2. Виходячи з фізичних основ процесу сушіння та структури математичної моделі з розподіленими параметрами, гладкості просторового розподілу температури (і, відповідно, вологості) зернової маси, а також аперіодичності динамічних процесів, з метою спрощення побудови САК процесом, доцільно перейти від системи з розподіленими до системи з зосередженими параметрами, представивши її матричною передаточною функцією зв'язку i -х вхідних з j -ми вихідними змінними, які вимірюються у відповідних точках агрегату обмеженою кількістю первинних перетворювачів температури і вологості.

3. Розроблено структуру і алгоритм функціонування багатомірної автономної САК з еталонною моделлю, яка з достатньою якістю відпрацьовує завдання сушіння зерна. Однак у процесі сушіння параметри зерна змінюються. Це призводить до того, що система не може якісно керувати процесом сушіння

(з'являється перерегулювання, збільшується час перехідного процесу) або взагалі стає не керованою. Показано, що для вирішення даної проблеми потрібно відслідковувати зміну параметрів об'єкта керування. Дану проблему вирішує побудова підсистеми ідентифікації. Доповнення системи автономного оптимального (в сенсі відповідності до еталона) керування сушаркою, як багатомірним об'єктом, підсистемою ідентифікації параметрів прямих і перехресних зв'язків в об'єкті керування, дозволило створити функціонально надійну САК в умовах нестационарності і стохастичності характеристик об'єкта і середовища.

4. Використання системного підходу та структури і алгоритмів функціонування багаторазово адаптивної системи ідентифікації (БАСІ, табл. 4.1, рис. 4.1, рис. 4.2) дозволило коректно підібрати метод ідентифікації процесів у сушарці.

Враховуючи не стандартну для використання метода найменших квадратів реальну ситуацію зашумленості як вихідних, та і вхідних змінних об'єкта ідентифікації, в якості оптимального (в сенсі незміщеності і ефективності оцінок параметрів) був протестований і використаний більш досконалий (ніж МНК) метод мінімізації оптимально взваженої суми симетричних кореляційних функцій (4.23).

5. Отримані незміщені і ефективні оцінки параметрів передаточних функцій сушарки дозволили реалізувати оптимальні адаптивні алгоритми автономного керування окремими каналами температури і вологості сушарки як багатомірного об'єкта з перехресними зв'язками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Атаназевич В.И. Сушка зерна. М.: Агропромиздат, 1989. – 240 с.
2. Станкевич Г.М., Страхова Т.В. Атаназевич В.И. Сушіння зерна. Київ, Либідь, 1997. – 352 с.
3. Жидко В.И., Резников В.А., Уколов В. С. Зерносушение и зерносушилки. М.: Колос, 1982. – 239 с.
4. Інструкція по сушінню продовольчого, кормового зерна, насіння олійних культур та експлуатації зерносушарок. Одеса–Київ, 1997. – 72 с.
5. Малин Н.И. Снижение энергозатрат на сушку зерна. М.: ЦНИИТЭИ ВНПО Зернопродукт, 1991. С. 1–46.
6. Малин Н.И. Справочник по сушке зерна. М.: Агропромиздат, 1986. 158 с.
7. Журавлёв А.П. Зерносушение и зерносушилки. Монография. – Кинель: РИЦ СГСХА, 2014. – 293 с.
8. Шевцов А.А., Дранников А.В., Куцов С.В. Зерносушение. Учебное пособие. – Воронеж: ВГТА, 2011. – 80 с.
9. Анисимова Л.В. Проектирование элеваторов. Учебное пособие. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И. И. Ползунова, 2004. – 167 с.
10. Винокуров К.В. Элеваторы, склады, зерносушилки. Учебное пособие. – Саратов, СГТУ, 2008. – 88 с.
11. Арынгазин К.Ш., Сарлыбаева Л.М., Тлеубай А.Т. Технология элеваторной промышленности. Учебное пособие. – Павлодар, ПГУ им. С. Торайгырова, 2006. – 60 с.
12. Мусынов К.М., Гордеева Е.А. Технология хранения и переработки продукции растениеводства. Учебное пособие. – Астана: Казахский государственный агротехнический университет, 2007. – 367 с.
13. Личко Н.М., Курдина В.Н., Мельников Е.М. и др. Технология переработки растениеводческой продукции. Учебник. – Под общ. ред. Личко Н.М. – М.: Колос, 2008. – 583 с.

14. Манжесов В.И., Попов И.А., Щедрин Д.С. Технология хранения растениеводческой продукции. Учебное пособие. – Воронеж: Изд-во ВГАУ имени К.Д. Глинки, 2009. – 249 с.
15. Снежкін Ю.Ф. та ін. Теплонасосна зерносушарка для насінневого зерна. К.: Поліграф–Сервіс, 2012. – 154 с.
16. Захарченко Р.В. Методи зберігання зернових культур з автоматичним підтриманням необхідних параметрів / А.М. Сільвестров, О.В. Шульга, Р.В. Захарченко // Тези 66-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 15 квітня – 15 травня 2014 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2014. – Т. 1. – С. 45 – 47.
17. Пришляк В.М., Яропуд В.М., Ковальчук О.В., Бабин І.А. Конструкція, розрахунок і виробництво сільськогосподарських машин. Навчальне видання. – Вінниця: РВВ ВНАУ, 2009. – 72 с.
18. Захарченко Р.В. Дослідження засобів захисту зерна від шкідливих захворювань у елеваторах за допомогою автоматичного контролю кліматичних характеристик / А.М. Сільвестров, О.В. Шульга, Р.В. Захарченко // Тези 66-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 15 квітня – 15 травня 2014 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2014. – Т. 1. – С. 47 – 48.
19. Зверев С.В., Зверев Н.С. Физические свойства зерна и продуктов его переработки. М.: ДеЛи принт, 2007. – 176 с.
20. Козьмина Н.П., Гунькин В.А., Сусянок Г.М. Зерноведение. М.: Колос, 2006. – 464 с.
21. Филин В.М., Устименко Т.В. Рис–зерно. Определение типового состава и класса зерна. Москва: ДеЛи принт, 2004. – 88 с.
22. Хавалойес П. Зернобобовые. Питательные зерна устойчивого будущего. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (ФАО), 2016. – 196 с.
23. Хозяев И.А. Хлеб наш насущный. Учебник. – Ростов–на–Дону: ДГТУ, 2010. – 310 с.

24. Челнокова Е.Я., Федотов В.А. Зерноведение. Оренбург : ОГУ, 2016. – 148 с.
25. Бутковский В.А., Галкина Л.С., Птушкина Г.Е. Современная техника и технология производства муки. Учебное пособие. – М.: ДеЛи принт, 2006. – 319 с.
26. Войсковой А.И., Гурская О.А., Зубов А.Е. Технология переработки и использования зерна с учетом качества. Учебно–методическое пособие. – Ставрополь: Изд–во СтГАУ «АГРУС», 2010. – 64 с.
27. Жигунов Д.А., Волощенко О.С. Мучные смеси из зерновых культур. Монография. – Одесса: Освіта України, 2013. – 156 с.
28. Капустин И.В., Грицай Д.И., Петенев А.Н., Кулаев Е.В. Технологии и оборудование крупяного производства. Учебно – методическое пособие. – Ставрополь: АГРУС, 2014. – 53 с.
29. Мерко І.Т. Технології мукомельного і круп'яного виробництва. Вид. 2–е, перероблене та доповнене. – Одеса: Друкарський дім, 2010. – 472 с.
30. Мурашов О.В., Алексейчева Е.Ю., Стрелков Е.В. Эффективное развитие предприятий мукомольной промышленности. Монография. Под ред. д.э.н., проф. Магомедова М.Д. – М.: Дашков и К., 2014. – 216 с.
31. Нетребский А.А. Интенсификация измельчения зерна. Монография. – Одесса: Друк, 2006. – 385 с.
32. Никифорова Т.А. Рациональное использование вторичного сырья крупяных производств. Монография. – Оренбург: ОГУ, 2015. – 140 с.
33. Оспанов А.А., Тимурбекова А.К. Технология производства полизлаковых продуктов. Учебное пособие. – Алматы: ТОО "Нур–Принт", 2011. – 112 с.
34. Перегуда М.А., Харченко Є. І. Технологія борошномельного виробництва. Конспект лекцій. – К.: НУХТ, 2011. – 80 с.
35. Тарасенко С.С. Современная технология мукомольного производства. Часть 1. Теоретические основы технологии муки. Оренбург: ОГУ, 2017. – 174 с.
36. Турчанинова Т.П. Техника и технология бестарного хранения муки. М.: Пищепромиздат, 2009. – 536 с.

37. Федорова Р.А. Биохимические основы продуктов переработки зерна. СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 98 с.
38. Филин В.М. Технология и оборудование для производства кукурузной и других круп. М.: ДеЛи принт, 2007. – 224 с.
39. Цуканов М.Ф., Изотова А.И. Мукомольное производство предприятий малой мощности. Учебно–практическое пособие. – М.: МГУТУ, 2004. – 36 с.
40. Чеботарев О.Н., Шаззо А.Ю., Мартыненко Я.Ф. Технология муки, крупы и комбикормов. Москва, Ростов н/Д.: МарТ, 2004. – 688 с.
41. Гапонюк О.І., Остапчук М.В., Станкевич Г.М., Гапонюк І.І. Активне вентилування та сушіння зерна. Одеса, ВМВ, 2014. – 326 с.
42. Погожих М.І. та др. Енергоефективні технології та техніка сушіння харчової сировини. Навчальний посібник. – Харків: Харківський державний університет харчування та торгівлі (ХДУХТ), 2016. – 234 с.
43. Подпрятков Г.І. та ін. Зберігання і переробка продукції рослинництва. Навчальний посібник. – К.: Мета, 2002. – 495 с.: іл.
44. Попов Н.Я. Повышение эффективности работы зерносушилок с повторным использованием агента сушки. М.: ЦНИИИТЭИ хлебопродуктов, 1991. С. 1–64.
45. Резников В.А. Теория и практика энергосбережения при сушке зерна. М.: ЦНИИИТЭИ хлебопродуктов, 1991. С. 1–56.
46. Чорний О.П., Луговой А.В. и др. Моделювання електромеханічних систем. Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й.Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В.– Кременчук, 2001. – 410 с.
47. Герман–Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. Учебное пособие. – СПб.: Корона–Век, 2008. – 368 с.
48. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2005. – 512 с.
49. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. Пер. с англ. Б. И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.

50. Онищенко Г.Б., Аксенов М.И. и др. Автоматизированный электропривод промышленных установок. Под общей редакцией Г. Б. Онищенко. М.: РАСНХ, 2001. – 520 с.
51. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». – Иваново: ИГЭУ, 2008. – 98 с.
52. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000 г. , 654 стр.
53. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink. Томск: ТПУ, 2008. – 320 с.
54. Махней О.В. Математичне моделювання. Навчальний посібник. – Івано–Франківськ : Супрун В. П., 2015. – 372 с.
55. Безрук В.М. Векторна оптимізація та статистичне моделювання в автоматизованому проектуванні систем зв'язку. Харків: ХНУРЕ, 2002. – 164с.
56. Булгаков Ю.Ф., Трофимов В.О., Кавера О.Л., Ніколаєв Є.Б. Комп'ютерне моделювання аварійних вентиляційних режимів. Навчальний посібник.– Донецьк: Донбас, 2014. – 139 с.
57. Стеценко І.В. Моделювання систем. Черкаси : ЧДТУ, 2010. – 399 с.
58. Трусков П.В. (ред.) Введение в математическое моделирование. Учебное пособие. – М.: Логос, 2005. – 440 с.
59. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. 2–е изд., испр. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
60. Петухов О.А., Морозов А.В., Петухова Е.О. Моделирование: системное, имитационное, аналитическое. Учебное пособие. – СПб.: издательство СЗТУ, 2008. – 288 с.
61. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. – 420 с.
62. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем. Учебник для вузов. – Мн.: Дизайн–ПРО, 2004. – 640 с.

63. Бахрушин В.Є. Математичне моделювання. Запоріжжя: ГУ "ЗІДМУ", 2004. – 140 с.
64. Теплицький І.О. Елементи комп'ютерного моделювання. Навчальний посібник. – Кривий Ріг: КДПУ, 2010. – 264 с.
65. Завгородня Н.М., Панченко С.В., Бантюков С.Є., Меркулов В.С. Математичні методи і моделі: комп'ютерне моделювання. Підручник. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – 185 с.
66. Веселовський В. Б, Дреус А.Ю., Сяєв А.В. Математичне моделювання та методи розрахунку теплотехнологічних процесів: Навчальний посібник. Дніпропетровськ: Видавництво Дніпропетровського університету, 2004. – 248 с.
67. Єріна А.М. Статистичне моделювання та прогнозування. Навчальний посібник. – К.: КНЕУ, 2001. – 170 с.
68. Пархоменко М.Д., Горевой І.М. Моделювання пристроїв та систем автоматики. КДТУ, 2003. – 172 с.
69. Толочко О.І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу. Навчальний посібник. – Київ: НТУУ«КПІ», 2016. – 150 с.
70. Букетов А.В. Ідентифікація і моделювання технологічних об'єктів та систем. Навчальний посібник для студентів вищих технічних закладів. – Тернопіль: СМП «Тайп».– 2009.– 260с.
71. Захарченко Р.В. Аналіз режимів сушки на основі математичної моделі / Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2015. – Випуск 3(35). – С. 83 – 84.
72. Захарченко Р.В. Аналіз режимів сушки зерна на основі математичної моделі / Р.В. Захарченко // Тези 68-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 19 квітня – 13 травня 2016 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2016. – Т. 1. – С. 47 – 49.
73. Лазарев Ю.Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab. Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – 421 с.

74. Мещанінов О.П. Моделювання систем. Навчальний посібник. – Миколаїв: Вид-во МФ НаУКМА, 2001. – 268 с.
75. Островерхов М.Я., Пижов В.М. Моделювання електромеханічних систем в Simulink. Навчальний посібник для студентів вищих технічних закладів. – К: ВД Стилос, 2008. – 532 с.
76. Довгань С.М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання. Дніпропетровськ: НГА України, 2001.–137 с.
77. Стоян В.А. Моделювання та ідентифікація динаміки систем із розподіленими параметрами. Навчальний посібник. – К.: Київський університет, 2003. – 187 с.
78. Хвищун І.О. Програмування і математичне моделювання. Київ: Видавничий Дім Ін Юре, 2007. – 545 с.
79. Харченко Д.О. Методи описання і моделювання стохастичних систем. Навчальний посібник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2007. – 206 с.
80. Ковалюк Д.О., Москвіна С.М. Моделювання теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами. Монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 182 с.
81. Гліненко Л.К., Сухоносів О.Г. Основи моделювання технічних систем. Навчальний посібник. – Львів: Бескид Біт, 2003. – 176 с.
82. Крутовий Ж.А., Любар С.В., Манжос Н.В. Оптимізація технологічних процесів. Частина 1. Математичне моделювання. Навчальний посібник. – Харків: Харківський державний університет харчування та торгівлі (ХДУХТ), 2011. – 300 с.
83. Остапчук Ж.І., Кулик В.В., Тептя В.В. Моделювання в задачах розвитку електричних систем. Навчальний посібник. – Вінниця: Вінницький національний технічний університет (ВНТУ), 2008. – 128 с.
84. Чорний О.П., Титюк В.К., Істоміна Н.М., Власенко В.А.. Математичні методи моделювання. Навчальний посібник. – Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2016. – 236 с.

85. Сегеда М.С. Метаматичне моделювання в електроенергетиці. Львів: "Львівська політехніка", 2010. – 608 с.
86. Хусаїнов Д.Я., Харченко І.І., Шатирко А.В. Основи моделювання динамічних систем. Навч. посібник. – К.: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2010. – 130 с.
87. Остапчук М.В., Станкевич Г.М. Математичне моделювання на ЕОМ. Підручник. – Одеса: Друк, 2006. – 313 с.
88. Захарченко Р.В. Моделювання процесу теплообміну через елементарний шар зерна / Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2016. – Випуск 2(38). – С. 38 – 40.
89. Захарченко Р.В. Опис процесу теплообміну у шарі зерна / Р.В. Захарченко // Тези II Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика». (Полтава, 17 листопада 2016 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2016. – С. 44 – 46.
90. Синєглазов В.М., Сільвестров А.М. Теорія ідентифікації. Київ: Національний авіаційний університет, 2012. – 482 с.
91. Мокін Б.І., Мокін В.Б., Мокін О.Б. Математичні методи ідентифікації динамічних систем. Вінниця: ВНТУ, 2010. – 260 с.
92. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
93. Мокін Б.І., Мокін О.Б. Методологія та організація наукових досліджень. Навчальний посібник для студентів. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 180 с.
94. Євстіфєєв В.О. Теорія автоматичного керування. Частина 1: Лінійні безперервні та нелінійні системи. Навчальний посібник. За редакцією д. т. н., професора Д. Й. Родькіна. Кременчуцький державний університет імені Михайла Остроградського, 2005. – 244 с.
95. Захарченко Р.В. Аналіз багатовимірних систем за допомогою масиву відносних коефіцієнтів підсилення / Р.В. Захарченко // Системи управління,

навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2016. – Випуск 3(39). – С. 20 – 23.

96. Захарченко Р.В. Розв'язане керування багатовимірними системами / Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2016. – Випуск 4(40). – С. 18 – 20.

97. Захарченко Р.В. Керування багатовимірними системами за допомогою розв'язуючих мереж / О.В. Шульга, Р.В. Захарченко // Збірник наукових праць за матеріалами ІХ Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки». (Полтава, 7-9 грудня 2016 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2016. – С. 246 – 250.

98. Захарченко Р.В. Застосування розв'язуючих мереж при розв'язанні контурів багатовимірних систем / Р.В. Захарченко // Тези восьмої міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації». Державний університет телекомунікацій. – Київ, 11 – 12 квітня 2017 р. – С. 174.

99. Борисевич А.В. Теория автоматического управления: элементарное введение с применением MATLAB. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 200 с.

100. Ладанюк А.П., Трегуб В.Г., Ельперін І.В. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості. Київ: Аграрна освіта, 2001. – 224 с.

101. Проць Я.І., Савків В.Б., та ін. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. – 344с.

102. Галай М.В. Лінійні неперервні системи автоматичного керування. Навчальний посібник. – Полтава: ПНТУ, 2002. – 239 с.

103. Галай М.В. Імпульсні, цифрові та релейні системи автоматичного керування. Навчальний посібник. – Полтава: ПДТУ, 2002. – 200 с.

104. Шульга О.В. Автоматизоване керування електроприводами. Навчальний посібник. Полтава: ПолтНТУ, 2007. – 293 с.

105. Островерхов М.Я. Електротехнічні системи на основі електромагнітних виконавчих пристроїв для керування параметрами

технологічних процесів. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка», 2017. – 348 с.

106. Жулай Є.Л., Зайцев Б.В. та ін. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній. Підручник. – Київ.: Вища освіта, 2001. – 288 с.

107. Проць Я.І., Данилюк О.А., Лобур Т.Б. Автоматизація неперервних технологічних процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. – Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2008. – 239с.

108. Бабіченко А.К. та ін. Основи вимірювань та автоматизації технологічних процесів. Підручник – Х.: Вид-во ТОВ "С.А.М." 2009. – 616 с.

109. Сумик М.М., Прудіус І.Н., Сумик Р.М. Теорія сигналів. Підручник. – Львів: Бескид Біт, 2008. – 232 с.

110. Баховець Б.О. Автоматизований електропривод. Навчальний посібник. – Рівне : НУВГП, 2010. – 238 с.

111. Бессараб В.І. Математичні основи теорії дискретно–безперервних систем. Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011 – 175 с.

112. Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно–регулируемые асинхронные электроприводы с широтно–импульсной модуляцией. Монография. Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470 с.

113. Мурин Г.О. Теплотехнічні вимірювання (Частина 1). Переклад з 3–го виправленого і доповненого російського видання. К.: Державне видавництво технічної літератури УСССР. – 1960. – 438 с.

114. Мурин Г.О. Теплотехнічні вимірювання (Частина 2). Переклад з 3–го виправленого і доповненого російського видання. К.: Державне видавництво технічної літератури УСССР. – 1960. – 438 с.

115. Ogorodnik V. Automated control of the grain drying process / Ogorodnik Vadim, Kleperis Janis, Kristinsh Albert, Gvardyna Irina, Cesnieks Aivars, Vilde Arvids // Engineering for rural development Jelgava, 28-29.05.2009, p. 324-327.

116. Lihui Zhang. Parameters online detection and model predictive control during the grain drying process / Helei Cui, Hongli Li, Feng Han, Yaqiu Zhang, Wenfu Wu // Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Volume 2013.

117. Зеленський К.Х. Комп'ютерні методи прикладної математики / Зеленський К.Х., Ігнатенко В.М., Коц О.П. – К.: Академперіодика, 2002. – 480 с.

118. Кубрак А.И., Жученко А.И., Ярощук Л.Д. Методы и программы для исследования систем автоматизации: Учеб, пособие.– К.: УМК ВО, 1989. – 228с.

119. Патент на корисну модель №78541. України. МПК G01R 31/02. Спосіб вимірювання параметрів лінеаризованої моделі відносно базового режиму моделі нелінійної динаміки електротехнічних об'єктів / Сільвестров А.М., Скринник О.М., Уманська К.В., Гонтар М.М., заявник та власник патенту НТУУ "КПІ" – Завл. 22.08.2012, опубл. 25.03.2013. Бюл. № 6/2013.

120. Сильвестров А. Н. Идентификация и оптимизация автоматических систем / А. Н. Сильвестров, П. И. Чинаев. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.

121. Сільвестров А.М. Забезпечення інваріантності напруги до струму якоря в генераторі постійного струму / Сільвестров А.М., Скринник О.М. // тези 68 наукової конференції. – 2016. – Т. 1. – С. 19–21.

122. Сільвестров А.М. Ідентифікація нелінійних статичних залежностей з динаміки електротехнічних систем/Зіменков Д.К., Сільвестров А.М., Скринник О.М.// "Системні дослідження та інформаційні технології". – 2016. – №1. – С. 99–106.

123. Сільвестров А.М. Виявлення закономірності у вібраціях об'єкта для діагностики та прогнозування його стану / Сільвестров А.М., Скринник О.М., Спінул Л.Ю., Уманська К.В. // "Компрессорное и энергетическое машиностроение". –2014. – №1(35). – С. 16–20.

124. Сільвестров А.М. Застосування теорії фільтрів для аналітичного опису логіко–аналітичних залежностей / Кривобока Г.І., Сільвестров А.М., Скринник О.М. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2013. – № 2. – С. 64–69.

125. Сільвестров А.М. Структурно–параметрична ідентифікація статичної нелінійності динамічного об'єкта / Сільвестров А.М., Скринник О.М., Спінул Л.Ю.

// Адаптивні системи автоматичного управління НТУУ “КПІ”. – 2014. – № 1(24). – С. 105–112.

126. Сільвестров А.М. Применение метода аналитического описания кусочно–аналитических зависимостей / Божко К.М., Сільвестров А.М., Скринник О.М. // Bulgarian Journal for Engineering Design. – 2014. – issue 22. – page 33–38.

127. Сільвестров А.М. О некоторых методах идентификации нелинейных объектов / Сільвестров А.М., Самсонов В.В. // An International journal “Mathematics and Computer Science”, Journal of Qafqaz University. – 2011. – №32, С. 12–23.

128. Сільвестров А.М. Нариси з теорії ідентифікації/В. В. Самсонов, А. М. Сільвестров. // – К.: НУХТ, – 2012, – 222 с.

129. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации / Цыпкин Я. З. – М. : Наука, 1984. – 380 с.

130. Захарченко Р.В. Дослідження інтегрованого методу ідентифікації /А.М. Сільвестров, Г.І. Кривобока, Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2017. – Випуск 2(42). – С. 55 – 56.

131. Zaharchenko R.V. Research integrated identification method / A.M. Silvestrov, G.I. Kryvoboka, R.V. Zaharchenko// Electronics and Control Systems. Kyiv. – 2017. – №1(51). – P. 88–90.

132. Захарченко Р.В. Дослідження інтегрованого методу ідентифікації / Р.В. Захарченко // Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства». КрНУ ім. Михайла Остроградського. – Кременчук, 20-21 квітня 2017 р. – С. 90.

133. Захарченко Р.В. Моделювання інтегрованого методу ідентифікації в середовищі MATLAB / А.М. Сільвестров, Р.В. Захарченко // Тези 69-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 19 квітня – 19 травня 2017 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2017. – Т. 1. – С. 3 – 4.

134. Zaharchenko R.V. Research integrated identification method for the work of grain dryer / A.M. Silvestrov, G.I. Kryvoboka, R.V. Zaharchenko // The development of technical science: problems and solutions. Proceedings of the international research and practical conference. – The Czech Republic, Brno. – April 27 – 28, 2018. – pp. 105-108.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛТАВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СУШІННЯ
ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1

Результати експериментальних досліджень процесу сушіння пшениці

Час, сек	Температура сушильного агента, °С	Відносна вологість сушильного агента, %	Температура зерна, °С	Відносна вологість зерна, %
0	16	48,05	15,7	36,905
2,459	15,9	48,135	15,6	36,89
4,818	15,9	48,235	15,6	36,79
7,278	15,8	48,32	15,6	36,89
9,788	15,8	48,32	15,6	36,79
12,199	15,8	48,32	15,6	36,69
14,609	15,8	48,32	15,6	36,79
17,17	15,8	48,42	15,6	36,89
19,528	15,8	48,42	15,6	36,79
21,989	15,8	48,42	15,6	36,79
24,45	15,8	48,42	15,6	36,89
26,958	15,8	48,52	15,6	36,89
29,469	15,8	48,52	15,6	36,69
31,879	15,8	48,62	15,6	36,49
34,39	15,8	48,62	15,6	36,39
36,749	15,8	48,72	15,6	36,39
39,208	15,8	48,62	15,6	36,39
41,619	15,8	48,62	15,6	36,39
44,13	15,8	48,62	15,6	36,19
46,64	15,8	48,52	15,6	36,09
49,15	15,8	48,52	15,6	36,19
51,561	15,8	48,62	15,6	36,19
53,97	15,8	48,62	15,6	36,19
56,479	15,8	48,72	15,6	36,19
58,89	15,8	48,82	15,6	36,19
61,299	15,8	48,82	15,6	35,89
63,811	15,8	48,92	15,6	35,79
66,221	15,8	48,92	15,6	35,89
68,731	15,8	48,82	15,6	36,09
71,14	15,8	48,82	15,6	35,89
73,651	15,8	48,82	15,6	35,79
76,111	15,8	48,82	15,6	36,19
78,521	15,8	48,82	15,6	36,69
80,982	15,8	48,82	15,6	36,69
83,39	15,8	48,92	15,6	36,69
85,8	15,8	48,92	15,6	36,49
88,161	15,8	48,92	15,5	36,875
90,62	15,8	48,92	15,6	37,09
93,29	15,8	49,02	15,6	37,09
95,44	15,8	49,02	15,6	36,99
97,949	15,8	49,02	15,6	36,79

100,361	15,8	49,12	15,6	36,19
102,871	15,8	49,12	15,5	36,175
105,38	15,8	49,02	15,6	35,99
107,89	15,8	48,92	15,6	35,89
110,302	15,8	48,92	15,6	35,79
112,71	15,8	48,92	15,6	35,89
115,222	15,8	48,92	15,6	35,99
117,632	15,8	49,02	15,6	35,99
120,141	15,8	49,02	15,6	35,99
122,652	15,8	49,12	15,5	35,975
125,163	15,8	49,22	15,6	35,99
127,623	15,8	49,22	15,6	36,19
130,82	15,8	49,22	15,6	36,29
132,593	15,8	49,12	15,5	36,175
135,104	15,8	49,12	15,6	36,29
137,563	15,8	49,12	15,5	36,375
140,24	15,8	49,02	15,6	36,39
142,434	15,8	49,12	15,6	36,39
144,893	15,8	49,12	15,6	36,49
147,304	15,8	49,22	15,6	36,59
149,712	15,8	49,32	15,6	36,89
152,173	15,8	49,42	15,6	37,09
154,533	15,8	49,42	15,6	37,39
156,942	15,8	49,42	15,6	37,59
159,404	15,8	49,32	15,6	37,39
161,912	15,8	49,22	15,6	37,09
164,423	15,8	49,22	15,6	36,79
166,833	15,8	49,22	15,6	36,99
169,244	15,8	49,22	15,6	37,19
171,703	15,8	49,32	15,6	37,29
174,164	15,8	49,42	15,6	37,89
176,673	15,8	49,52	15,6	38,59
179,85	15,8	49,52	15,6	37,49
181,444	15,8	49,52	15,6	37,19
183,904	15,8	49,52	15,6	38,29
186,414	15,8	49,42	15,6	39,79
188,923	15,8	49,42	15,6	40,19
191,434	15,8	49,32	15,6	39,59
193,845	15,8	49,32	15,6	38,69
196,304	15,8	49,32	15,6	38,09
198,714	15,8	49,42	15,6	37,99
201,175	15,8	49,42	15,6	37,89
203,684	15,8	49,42	15,6	37,89
206,195	15,8	49,42	15,6	37,89
208,656	15,8	49,52	15,6	37,79
211,117	15,8	49,52	15,6	37,79
213,626	15,8	49,52	15,6	37,19
216,37	15,8	49,62	15,6	37,49
218,546	15,8	49,62	15,6	38,19
220,955	15,8	49,72	15,6	38,19

223,466	15,8	49,72	15,6	38,49
225,977	15,8	49,72	15,6	38,39
228,337	15,8	49,62	15,6	38,49
230,796	15,8	49,62	15,6	38,29
233,207	15,8	49,62	15,6	37,99
235,716	15,8	49,52	15,6	37,79
238,128	15,8	49,52	15,6	37,79
240,688	15,8	49,52	15,6	38,29
243,197	15,8	49,52	15,6	38,79
245,608	15,8	49,62	15,6	38,79
248,119	15,8	49,62	15,6	38,09
250,578	15,8	49,62	15,6	37,59
253,39	15,8	49,72	15,6	37,79
255,449	15,8	49,72	15,6	37,69
257,858	15,8	49,72	15,6	37,89
260,368	15,8	49,82	15,6	38,19
262,778	15,8	49,82	15,6	37,99
265,289	15,8	49,82	15,6	37,99
267,799	15,8	49,92	15,6	38,39
270,26	15,8	49,92	15,6	38,29
272,718	15,8	49,92	15,6	37,99
275,23	15,8	49,92	15,6	38,39
277,69	15,8	49,92	15,6	38,79
280,151	15,8	49,92	15,7	38,805
282,66	15,8	49,92	15,6	38,59
285,17	15,8	49,92	15,7	38,505
287,68	15,8	49,92	15,7	38,405
290,4	15,8	49,92	15,7	38,405
292,501	15,8	49,92	15,7	38,305
294,962	15,8	49,92	15,7	38,205
297,42	15,8	49,92	15,7	38,405
299,83	15,8	49,92	15,7	38,505
302,342	15,8	49,92	15,7	38,505
304,751	15,8	49,92	15,7	38,505
307,261	15,8	50,02	15,7	38,205
309,721	15,8	50,02	15,7	37,905
312,182	15,8	50,02	15,7	38,005
314,691	15,8	50,02	15,7	38,005
317,52	15,9	50,035	15,7	38,005
319,511	15,8	50,02	15,7	38,005
322,23	15,8	50,02	15,7	38,005
324,532	15,8	50,02	15,7	38,005
327,44	15,8	50,02	15,7	37,705
329,553	15,9	50,135	15,8	37,72
331,963	15,8	50,12	15,8	38,22
334,473	15,8	50,22	15,8	38,02
336,884	15,8	50,22	15,8	38,32
339,394	15,8	50,32	15,8	38,32
341,804	15,8	50,32	15,8	38,12
344,213	15,9	50,335	15,8	38,12

346,623	15,8	50,32	15,8	37,92
349,134	15,8	50,22	15,8	37,72
351,544	15,8	50,22	15,8	37,42
354,54	15,8	50,22	15,8	37,22
356,563	15,8	50,22	15,8	37,02
358,975	15,8	50,22	15,8	36,92
361,484	15,8	50,22	15,8	36,92
363,996	15,9	50,235	15,8	37,22
366,404	15,9	50,235	15,8	37,62
368,915	15,8	50,12	15,8	37,72
371,325	15,9	50,235	15,8	37,62
373,835	15,8	50,22	15,8	37,52
376,246	15,8	50,22	15,8	37,12
378,654	15,8	50,32	15,8	36,52
381,165	15,9	50,335	15,8	36,02
383,677	15,9	50,335	15,8	36,32
386,85	15,9	50,335	15,8	36,52
388,596	15,9	50,235	15,8	36,82
391,6	15,9	50,235	15,7	37,305
393,516	15,9	50,135	15,7	37,605
396,27	15,8	50,12	15,8	37,92
398,437	15,9	50,135	15,8	37,82
400,846	15,8	50,22	15,7	37,505
403,356	15,9	50,335	15,8	37,32
405,868	15,9	50,335	15,7	37,305
408,278	15,8	50,32	15,7	37,405
410,687	15,9	50,335	15,7	37,405
413,197	15,9	50,335	15,7	37,105
415,709	15,8	50,32	15,7	37,005
418,118	15,9	50,335	15,7	37,205
420,628	15,8	50,32	15,7	37,805
423,139	15,9	50,335	15,7	38,205
425,649	15,9	50,335	15,7	38,105
428,16	15,9	50,235	15,7	38,005
430,67	15,8	50,22	15,7	37,905
433,79	15,9	50,135	15,7	37,605
435,591	15,9	50,135	15,7	37,005
438,101	15,9	50,035	15,7	36,305
440,61	15,8	50,12	15,7	36,005
443,22	15,9	50,135	15,7	36,105
445,43	15,9	50,235	15,7	36,105
447,841	15,9	50,235	15,7	36,005
450,351	15,9	50,235	15,7	36,205
452,86	15,9	50,235	15,7	36,305
455,272	15,9	50,235	15,7	36,305
457,782	15,9	50,235	15,7	36,405
460,191	15,9	50,235	15,7	36,405
462,701	15,9	50,335	15,7	36,605
465,213	15,9	50,335	15,7	37,105
467,722	15,9	50,435	15,7	37,605

470,234	15,9	50,635	15,7	37,705
472,643	15,9	50,635	15,7	37,105
475,153	15,9	50,635	15,7	36,605
477,562	15,9	50,435	15,6	36,49
480,74	15,9	50,335	15,7	36,505
482,484	15,9	50,235	15,6	36,29
484,994	15,9	50,235	15,6	36,39
487,503	15,9	50,235	15,6	36,39
490,15	15,9	50,235	15,6	36,29
492,524	15,9	50,235	15,6	36,19
495,36	15,9	50,335	15,6	35,99
497,445	15,9	50,535	15,6	35,79
499,955	15,9	50,635	15,6	35,59
502,365	15,9	50,735	15,6	35,59
504,877	15,9	50,735	15,6	35,49
507,385	15,9	50,735	15,6	35,49
509,897	15,9	50,735	15,6	34,89
512,307	15,9	50,735	15,6	34,79
514,716	15,9	50,635	15,6	34,69
517,127	15,9	50,535	15,6	34,59
519,638	15,9	50,435	15,6	34,59
522,146	15,9	50,435	15,6	34,59
524,658	15,9	50,335	15,6	34,59
527,67	15,9	50,335	15,6	34,99
529,578	15,9	50,335	15,6	34,19
532,88	15,9	51,535	15,6	34,39
534,497	15,9	51,535	15,6	35,09
537,8	15,9	51,135	15,6	35,59
539,418	15,9	51,135	15,6	36,29
541,828	15,9	51,035	15,6	36,09
544,338	15,9	50,935	15,6	35,59
546,848	15,9	50,935	15,6	35,69
549,359	15,9	51,135	15,6	35,79
551,869	15,9	51,335	15,6	36,79
554,278	15,9	51,335	15,6	37,09
556,789	15,9	51,135	15,6	36,99
559,299	15,9	51,035	15,5	37,075
561,81	15,9	50,835	15,6	37,09
564,32	15,9	50,835	15,6	36,89
566,831	15,9	50,735	15,6	36,79
569,241	15,9	50,835	15,6	36,69
571,651	15,9	50,835	15,6	36,69
574,6	15,9	50,835	15,6	36,49
576,471	15,9	50,935	15,6	36,59
578,981	15,9	50,935	15,6	36,79
581,392	15,9	51,035	15,6	36,89
583,75	15,9	51,035	15,6	36,99
586,161	15,9	51,035	15,6	37,29
588,57	15,9	50,935	15,6	37,59
590,929	15,9	50,935	15,6	37,79

593,39	15,9	50,835	15,6	37,99
595,749	15,9	50,735	15,5	37,875
598,21	15,9	50,735	15,6	37,69
600,568	15,9	50,635	15,6	37,59
603,3	15,9	50,635	15,5	37,675
605,489	15,9	50,635	15,6	37,79
607,95	15,9	50,735	15,6	37,89
610,359	15,9	50,835	15,6	37,99
612,87	15,9	50,835	15,5	37,975
615,33	15,9	50,835	15,5	37,875
617,791	15,9	50,835	15,5	37,875
620,15	15,9	50,835	15,6	37,89
622,609	15,9	50,835	15,5	37,775
625,7	15,9	50,835	15,5	37,675
627,429	15,9	50,835	15,5	37,575
629,89	15,9	50,835	15,5	37,375
632,349	15,9	50,835	15,5	37,075
634,809	15,9	50,835	15,5	36,875
637,219	15,9	50,935	15,5	36,775
639,63	15,9	51,035	15,5	36,675
642,39	15,9	51,135	15,5	36,775
644,499	15,9	51,235	15,5	36,875
646,859	15,9	51,335	15,5	37,075
649,219	15,9	51,335	15,5	37,275
651,679	15,9	51,235	15,5	37,475
654,88	15,9	51,135	15,5	37,675
656,599	15,9	51,035	15,5	37,875
659,59	15,9	50,935	15,5	38,175
661,52	15,9	50,835	15,5	38,375
663,879	15,9	50,835	15,5	38,675
666,289	15,9	50,935	15,5	38,775
668,648	15,9	51,035	15,5	38,775
671,7	15,9	51,135	15,5	38,875
673,367	15,9	51,235	15,5	38,975
675,828	15,9	51,235	15,5	39,075
678,187	15,9	51,335	15,5	39,175
680,646	15,9	51,435	15,5	39,175
683,107	15,9	51,435	15,5	39,075
685,466	15,9	51,435	15,5	38,975
687,927	15,9	51,335	15,5	38,775
690,387	15,9	51,235	15,5	38,475
692,846	15,9	51,135	15,5	38,275
695,257	15,9	51,035	15,5	38,175
697,716	15,9	51,035	15,5	37,975
700,177	15,9	51,035	15,5	37,875
702,638	15,9	51,035	15,5	37,875
704,997	15,9	51,035	15,5	37,875
707,458	15,9	51,035	15,5	37,875
709,916	15,9	51,135	15,5	37,775
712,278	15,9	51,235	15,5	37,875

714,786	15,9	51,335	15,5	37,875
717,297	15,9	51,335	15,5	37,975
719,656	15,9	51,335	15,5	37,975
722,117	15,9	51,235	15,5	38,075
724,627	15,9	51,135	15,5	38,175
727,138	15,9	51,035	15,5	38,175
729,598	15,9	50,935	15,5	38,375
732,8	15,9	50,935	15,5	38,575
734,468	15,9	50,935	15,5	38,675
736,828	15,9	50,935	15,5	38,675
739,289	15,9	50,935	15,5	38,875
741,648	15,9	51,035	15,5	38,975
744,107	15,9	51,135	15,5	39,075
746,468	15,9	51,235	15,5	39,075
748,927	15,9	51,435	15,5	39,075
751,286	15,9	51,535	15,5	38,975
753,747	15,9	51,635	15,5	38,875
756,106	15,9	51,635	15,5	38,675
758,466	15,9	51,735	15,5	38,375
760,927	15,9	51,735	15,5	38,275
763,385	15,9	51,635	15,5	38,175
765,896	15,9	51,535	15,5	38,075
768,205	15,9	51,535	15,5	37,975
770,666	15,9	51,435	15,5	37,875
773,26	15,9	51,335	15,5	37,875
775,536	15,9	51,335	15,5	37,775
777,895	15,9	51,235	15,5	37,575
780,306	15,9	51,235	15,5	37,275
782,664	15,9	51,235	15,5	37,075
785,125	15,9	51,235	15,5	37,075
787,585	15,9	51,235	15,5	37,175
790,46	15,9	51,235	15,5	37,475
792,505	15,9	51,235	15,5	37,575
794,864	15,9	51,235	15,5	37,675
797,276	15,9	51,335	15,5	37,675
799,684	15,9	51,335	15,5	37,775
802,145	15,9	51,435	15,5	37,575
804,455	15,9	51,535	15,5	37,475
806,914	15,9	51,535	15,5	37,275
809,374	15,9	51,635	15,5	36,975
811,835	15,9	51,735	15,5	36,675
814,346	15,9	51,735	15,5	36,375
816,755	15,9	51,735	15,5	36,075
819,265	15,9	51,735	15,5	35,975
821,624	15,9	51,635	15,5	35,975
823,984	15,9	51,535	15,5	35,975
826,445	15,9	51,535	15,5	35,875
828,905	15,9	51,535	15,4	35,76
831,416	15,9	51,535	15,4	35,56
833,874	15,9	51,535	15,4	35,66

836,335	15,9	51,535	15,5	35,675
838,796	15,9	51,535	15,4	35,36
841,255	15,9	51,635	15,4	35,06
843,716	15,9	51,635	15,4	34,96
846,177	15,9	51,735	15,4	34,86
848,536	15,9	51,735	15,4	34,86
850,945	15,9	51,835	15,4	34,96
853,356	15,9	51,835	15,4	34,76
855,815	15,9	51,835	15,4	34,76
858,224	15,9	51,835	15,4	34,76
860,736	15,9	51,835	15,4	34,56
863,145	15,9	51,835	15,4	34,56
865,556	15,9	51,735	15,4	34,66
867,914	15,9	51,735	15,4	34,56
870,374	15,9	51,735	15,4	33,66
872,885	15,9	51,835	15,4	34,66
875,294	15,9	52,035	15,4	36,56
877,656	15,9	52,035	15,4	36,96
880,114	15,9	52,035	15,4	36,26
882,625	15,9	52,135	15,4	35,96
885,135	15,9	52,035	15,4	36,26
887,596	15,9	49,635	15,5	55,475
890,56	15,9	40,135	15,5	64,375
892,315	15,9	35,835	15,5	67,075
894,624	15,9	33,635	15,5	67,575
896,984	15,9	32,635	15,5	67,075
899,294	15,9	32,135	15,4	66,36
901,603	16	31,85	15,4	65,56
903,911	16	31,65	15,4	64,76
906,27	16,1	31,565	15,3	63,945
908,632	16,1	31,465	15,3	63,245
910,89	16,2	31,28	15,3	62,445
913,148	16,2	31,08	15,2	61,83
915,408	16,3	30,995	15,2	61,23
917,718	16,4	30,81	15,2	60,73
920,26	16,5	30,625	15,1	60,215
922,335	16,6	30,44	15,1	59,815
924,745	16,7	30,255	15,1	59,315
927,5	16,8	29,97	15	58,9
929,314	16,9	29,785	15	58,5
931,572	17	29,6	14,9	58,085
933,882	17,2	29,33	14,9	57,885
936,14	17,3	29,045	14,9	57,485
938,45	17,4	28,76	14,8	57,17
940,81	17,6	28,49	14,8	56,87
943,119	17,7	28,205	14,8	56,57
945,479	17,9	28,035	14,7	56,455
947,888	18,1	27,765	14,7	56,155
950,197	18,2	27,48	14,6	56,04
952,458	18,4	27,31	14,6	55,94

954,767	18,6	27,04	14,6	55,74
957,75	18,7	26,855	14,5	55,525
959,484	18,9	26,685	14,5	55,425
961,844	19,1	26,415	14,4	55,41
964,155	19,3	26,145	14,4	55,31
966,513	19,5	25,775	14,4	55,21
968,822	19,7	25,505	14,4	55,11
971,81	19,9	25,235	14,3	54,995
973,541	20,1	24,965	14,3	54,895
975,851	20,3	24,595	14,2	54,78
978,21	20,5	24,325	14,2	54,78
980,62	20,8	23,97	14,2	54,78
983,8	21	23,6	14,1	54,665
985,44	21,2	23,33	14,1	54,565
987,799	21,4	22,96	14,1	54,565
990,158	21,7	22,605	14	54,55
992,468	21,9	22,235	14	54,55
994,828	22,1	21,865	14	54,45
997,138	22,3	21,595	13,9	54,535
999,497	22,6	21,24	13,9	54,535
1001,856	22,8	20,97	13,9	54,535
1004,267	23	20,7	13,9	54,535
1006,676	23,3	20,445	13,8	54,52
1009,85	23,6	20,09	13,8	54,52
1011,495	23,8	19,82	13,8	54,52
1013,856	24	19,45	13,8	54,52
1016,164	24,3	19,195	13,8	54,52
1018,525	24,5	18,825	13,7	54,405
1020,883	24,8	18,57	13,7	54,505
1023,143	25	18,3	13,7	54,605
1025,453	25,3	18,145	13,7	54,605
1027,712	25,5	17,775	13,7	54,605
1030,2	25,7	17,605	13,6	54,59
1032,331	26	17,35	13,6	54,69
1034,64	26,2	16,98	13,6	54,69
1037,99	26,5	16,725	13,6	54,79
1039,56	26,7	16,455	13,6	54,79
1041,92	27	16,3	13,6	54,79
1044,229	27,2	16,03	13,6	54,89
1046,488	27,5	15,775	13,6	54,89
1048,796	27,7	15,505	13,6	54,99
1051,107	28	15,25	13,5	54,975
1053,416	28,2	14,98	13,5	54,975
1055,824	28,5	14,825	13,5	55,075
1058,83	28,7	14,555	13,5	55,175
1060,395	28,9	14,385	13,5	55,175
1062,703	29,2	14,23	13,5	55,175
1065,113	29,4	14,06	13,5	55,275
1067,573	29,6	13,89	13,5	55,275
1069,932	29,9	13,735	13,5	55,275

1072,291	30,2	13,48	13,5	55,275
1074,551	30,4	13,31	13,5	55,375
1076,911	30,6	13,14	13,5	55,375
1079,321	30,9	12,885	13,5	55,375
1081,63	31,1	12,715	13,5	55,475
1083,938	31,3	12,545	13,6	55,49
1086,3	31,5	12,375	13,6	55,49
1088,609	31,8	12,12	13,6	55,49
1091,17	32	11,95	13,6	55,49
1093,327	32,3	11,895	13,6	55,59
1095,587	32,4	11,61	13,6	55,59
1097,947	32,6	11,54	13,6	55,59
1100,306	32,9	11,385	13,6	55,49
1102,614	33,1	11,215	13,6	55,49
1104,974	33,3	10,945	13,7	55,505
1107,385	33,5	10,775	13,7	55,505
1109,693	33,7	10,605	13,7	55,505
1112,104	33,9	10,535	13,7	55,505
1114,463	34,1	10,465	13,8	55,52
1116,772	34,4	10,31	13,8	55,42
1119,131	34,6	10,24	13,8	55,42
1121,39	34,8	10,07	13,8	55,42
1123,651	35	10	13,9	55,435
1125,91	35,2	9,93	13,9	55,435
1128,168	35,3	9,745	13,9	55,335
1130,527	35,5	9,575	13,9	55,335
1132,786	35,7	9,505	14	55,35
1135,46	35,9	9,435	14	55,25
1137,405	36,1	9,265	14,1	55,165
1139,765	36,3	9,195	14,1	55,165
1142,25	36,5	9,125	14,1	55,065
1144,284	36,7	9,055	14,1	55,065
1146,642	36,8	8,97	14,2	54,98
1149,1	37	8,9	14,2	54,98
1151,311	37,2	8,73	14,3	54,895
1153,621	37,3	8,645	14,3	54,795
1155,931	37,5	8,575	14,4	54,71
1158,239	37,7	8,405	14,4	54,61
1160,499	37,9	8,335	14,4	54,51
1162,807	38	8,25	14,5	54,425
1165,116	38,2	8,08	14,5	54,225
1167,477	38,3	8,095	14,6	54,14
1169,786	38,6	8,04	14,6	54,04
1172,95	38,7	7,955	14,7	53,955
1174,405	38,9	7,885	14,8	53,87
1176,864	39	7,7	14,8	53,77
1179,173	39,2	7,63	14,9	53,585
1181,534	39,3	7,645	14,9	53,485
1183,892	39,5	7,575	15	53,3
1186,203	39,7	7,405	15	53,2

1188,511	39,8	7,42	15,1	53,015
1190,871	39,9	7,235	15,1	52,815
1193,13	40,1	7,165	15,2	52,73
1195,541	40,2	7,18	15,2	52,53
1197,949	40,4	7,11	15,3	52,345
1200,359	40,5	7,025	15,3	52,145
1202,719	40,6	6,94	15,4	52,06
1205,79	40,8	6,87	15,5	51,975
1207,489	40,9	6,785	15,5	51,775
1209,848	41	6,7	15,6	51,59
1212,208	41,2	6,73	15,6	51,49
1214,517	41,2	6,63	15,7	51,405
1216,927	41,4	6,66	15,8	51,22
1219,287	41,5	6,575	15,8	51,02
1221,697	41,7	6,505	15,9	50,935
1224,5	41,9	6,435	15,9	50,735
1226,365	42,1	6,465	16	50,55
1228,725	42,2	6,28	16	50,45
1231,35	42,3	6,195	16,1	50,265
1233,444	42,4	6,11	16,2	49,98
1235,805	42,5	6,125	16,2	49,78
1238,264	42,6	6,04	16,3	49,595
1240,675	42,7	5,955	16,4	49,41
1243,34	42,8	5,97	16,4	49,21
1245,392	42,9	5,885	16,5	49,025
1247,754	43,1	5,915	16,5	48,925
1250,162	43,2	5,83	16,6	48,74
1252,524	43,3	5,845	16,7	48,555
1254,883	43,4	5,76	16,7	48,355
1257,241	43,6	5,79	16,8	48,17
1259,602	43,7	5,705	16,9	47,985
1261,962	43,8	5,72	16,9	47,785
1264,37	44	5,65	17	47,6
1266,832	44	5,55	17,1	47,415
1269,292	44,1	5,565	17,1	47,215
1271,702	44,3	5,495	17,2	47,13
1274,1	44,4	5,51	17,3	46,845
1276,472	44,5	5,425	17,3	46,645
1278,931	44,6	5,34	17,4	46,46
1281,291	44,7	5,355	17,5	46,275
1283,75	44,8	5,27	17,6	46,09
1286,212	44,9	5,185	17,7	45,805
1288,52	45	5,2	17,7	45,705
1291,31	45,2	5,13	17,8	45,42
1293,491	45,2	5,13	17,9	45,135
1296,3	45,3	5,145	18	44,95
1298,462	45,4	5,06	18	44,65
1300,922	45,4	4,96	18,1	44,465
1303,383	45,6	4,99	18,2	44,28
1305,843	45,6	4,89	18,3	43,995

1308,302	45,7	4,905	18,3	43,695
1310,713	45,8	4,92	18,4	43,51
1313,223	45,9	4,835	18,4	43,31
1315,683	46,1	4,865	18,5	43,225
1318,93	46,1	4,765	18,6	43,04
1320,553	46,2	4,78	18,6	42,84
1322,913	46,3	4,695	18,7	42,655
1325,223	46,3	4,695	18,8	42,47
1327,633	46,4	4,71	18,8	42,27
1329,993	46,5	4,725	18,9	42,085
1332,302	46,6	4,64	19	41,9
1334,561	46,6	4,64	19	41,7
1336,972	46,6	4,54	19,1	41,515
1339,38	46,8	4,57	19,2	41,33
1341,741	46,9	4,585	19,2	41,13
1344,51	47	4,5	19,3	40,945
1346,41	47	4,5	19,3	40,745
1348,819	47	4,5	19,4	40,56
1351,28	47,2	4,53	19,5	40,375
1353,74	47,3	4,545	19,6	40,19
1356,15	47,4	4,46	19,6	39,99
1358,661	47,5	4,375	19,7	39,805
1361,72	47,5	4,375	19,8	39,62
1363,431	47,5	4,375	19,9	39,335
1365,891	47,6	4,29	19,9	39,135
1368,35	47,7	4,305	20	38,95
1370,862	47,8	4,32	20,1	38,765
1373,22	47,9	4,235	20,1	38,565
1375,582	47,9	4,235	20,2	38,38
1377,99	48	4,25	20,3	38,195
1380,401	48	4,25	20,4	38,01
1382,811	48,1	4,165	20,4	37,81
1385,322	48,2	4,18	20,5	37,625
1387,732	48,2	4,18	20,6	37,44
1390,92	48,3	4,195	20,6	37,24
1392,501	48,4	4,11	20,7	37,055
1394,962	48,5	4,125	20,8	36,87
1397,371	48,6	4,04	20,9	36,685
1399,781	48,6	4,04	20,9	36,485
1402,192	48,6	4,04	21	36,3
1404,552	48,7	4,055	21,1	36,115
1407,11	48,8	3,97	21,2	35,93
1409,472	48,7	4,055	21,2	35,73
1411,883	48,8	4,07	21,3	35,545
1414,392	48,8	3,97	21,4	35,36
1416,902	48,9	3,985	21,5	35,175
1419,313	49	4	21,5	34,975
1421,772	49	4	21,6	34,79
1424,234	49,1	4,015	21,7	34,705
1426,542	49,1	3,915	21,7	34,505

1428,853	49,2	3,93	21,8	34,42
1431,213	49,3	3,945	21,9	34,235
1433,672	49,3	3,845	21,9	34,035
1435,982	49,3	3,845	22	33,75
1438,442	49,4	3,86	22	33,65
1440,802	49,5	3,875	22,1	33,465
1443,213	49,6	3,79	22,2	33,28
1445,623	49,7	3,805	22,2	33,18
1448,83	49,8	3,82	22,3	32,995
1450,543	49,9	3,835	22,4	32,91
1452,902	49,8	3,82	22,5	32,625
1455,312	49,9	3,835	22,5	32,525
1457,772	49,9	3,735	22,6	32,34
1460,83	49,9	3,735	22,6	32,24
1462,543	49,9	3,735	22,7	31,955
1464,953	50	3,75	22,8	31,87
1467,413	50,1	3,765	22,9	31,685
1469,823	50,2	3,78	22,9	31,585
1472,333	50,2	3,78	23	31,4
1474,844	50,3	3,795	23	31,3
1477,355	50,3	3,695	23,1	31,115
1479,866	50,3	3,795	23,2	31,03
1482,276	50,4	3,81	23,2	30,83
1484,737	50,4	3,71	23,3	30,745
1487,197	50,4	3,71	23,3	30,545
1489,656	50,5	3,725	23,4	30,46
1492,17	50,5	3,725	23,5	30,275
1494,427	50,5	3,725	23,5	30,075
1496,786	50,6	3,74	23,6	29,99
1499,297	50,7	3,655	23,6	29,79
1501,758	50,7	3,655	23,7	29,705
1504,118	50,7	3,655	23,7	29,605
1506,578	50,8	3,67	23,8	29,52
1508,988	50,9	3,685	23,8	29,42
1511,399	50,9	3,685	23,9	29,235
1513,807	50,9	3,685	23,9	29,135
1516,168	51	3,6	24	28,95
1518,628	51	3,6	24	28,85
1521,38	50,9	3,585	24,1	28,765
1523,499	51	3,6	24,1	28,665
1525,959	50,9	3,585	24,2	28,48
1528,319	51	3,6	24,2	28,38
1530,829	51	3,6	24,3	28,295
1533,239	51	3,6	24,4	28,11
1535,699	51,1	3,615	24,4	28,01
1538,161	51,2	3,63	24,5	27,925
1540,621	51,2	3,63	24,5	27,725
1543,31	51,2	3,63	24,6	27,64
1545,491	51,2	3,53	24,6	27,54
1547,953	51,2	3,53	24,7	27,455

1550,411	51,2	3,53	24,7	27,255
1552,873	51,3	3,545	24,8	27,27
1555,333	51,3	3,545	24,9	27,085
1557,793	51,3	3,545	24,9	26,985
1560,254	51,3	3,545	25	26,9
1562,663	51,4	3,56	25	26,8
1565,124	51,5	3,575	25,1	26,715
1567,584	51,5	3,475	25,1	26,615
1569,944	51,6	3,49	25,1	26,515
1572,406	51,6	3,49	25,2	26,43
1574,916	51,6	3,49	25,2	26,33
1577,426	51,6	3,49	25,3	26,245
1579,837	51,7	3,505	25,3	26,145
1582,246	51,7	3,505	25,4	26,06
1584,707	51,8	3,52	25,4	25,96
1587,167	51,7	3,505	25,4	25,86
1589,628	51,7	3,505	25,5	25,775
1592,88	51,7	3,505	25,5	25,675
1594,548	51,8	3,52	25,6	25,59
1597,9	51,8	3,52	25,6	25,49
1599,42	51,9	3,435	25,7	25,405
1601,931	51,9	3,435	25,7	25,305
1604,29	52	3,45	25,8	25,22
1606,701	52	3,45	25,8	25,22
1609,16	52	3,45	25,8	25,12
1611,62	52	3,45	25,9	25,035
1614,182	52,1	3,465	25,9	24,935
1616,541	52	3,45	26	24,85
1619,3	52,1	3,465	26	24,75
1621,411	52,1	3,365	26,1	24,665
1623,922	52,1	3,465	26,1	24,665
1626,433	52,2	3,48	26,2	24,58
1628,994	52,3	3,495	26,2	24,48
1631,456	52,3	3,395	26,3	24,395
1633,915	52,3	3,395	26,3	24,195
1636,375	52,2	3,38	26,4	24,21
1638,786	52,2	3,38	26,4	24,11
1641,145	52,2	3,38	26,4	24,01
1643,607	52,3	3,395	26,5	24,025
1646,67	52,4	3,41	26,5	23,925
1648,578	52,4	3,41	26,5	23,825
1651,139	52,4	3,41	26,6	23,74
1653,598	52,4	3,41	26,6	23,64
1656,58	52,5	3,425	26,6	23,64
1658,569	52,4	3,41	26,7	23,555
1660,931	52,4	3,41	26,7	23,455
1663,29	52,4	3,31	26,7	23,355
1665,699	52,4	3,31	26,8	23,27
1668,211	52,4	3,31	26,8	23,17
1670,671	52,5	3,325	26,9	23,085

1672,98	52,6	3,34	26,9	22,985
1675,491	52,6	3,34	26,9	22,985
1677,901	52,6	3,34	27	22,9
1680,362	52,6	3,34	27	22,9
1682,822	52,7	3,255	27,1	22,715
1685,233	52,6	3,34	27,1	22,715
1687,744	52,7	3,355	27,1	22,615
1690,204	52,7	3,355	27,2	22,53
1692,663	52,8	3,37	27,2	22,43
1695,224	52,7	3,355	27,3	22,345
1697,686	52,8	3,27	27,3	22,345
1700,97	52,8	3,27	27,3	22,245
1702,506	52,9	3,285	27,4	22,16
1704,916	52,9	3,285	27,4	22,16
1707,376	52,9	3,285	27,4	22,06
1709,838	52,9	3,285	27,5	21,975
1712,248	53	3,3	27,5	21,975
1714,708	52,9	3,285	27,5	21,775
1717,168	53	3,3	27,6	21,79
1719,629	53	3,3	27,6	21,69
1722,14	53	3,3	27,6	21,69
1724,6	53,1	3,215	27,7	21,605
1727,112	53,1	3,215	27,7	21,505
1729,623	53	3,2	27,7	21,405
1732,31	53,1	3,215	27,7	21,405
1734,542	53,2	3,23	27,8	21,32
1737,4	53,2	3,23	27,8	21,32
1739,514	53,1	3,215	27,9	21,235
1741,923	53,2	3,23	27,9	21,135
1744,435	53,3	3,245	27,9	21,135
1746,946	53,2	3,23	27,9	21,035
1749,355	53,2	3,23	28	21,05
1751,817	53,2	3,23	28	20,95
1754,227	53,3	3,245	28	20,85
1756,738	53,3	3,245	28,1	20,765
1759,298	53,2	3,23	28,1	20,765
1761,759	53,3	3,245	28,1	20,665
1764,218	53,3	3,245	28,1	20,665
1766,63	53,4	3,16	28,2	20,58
1769,14	53,4	3,26	28,2	20,58
1771,6	53,4	3,16	28,2	20,58
1773,911	53,4	3,16	28,3	20,495
1776,421	53,4	3,16	28,3	20,495
1778,781	53,5	3,175	28,3	20,395
1781,292	53,5	3,175	28,3	20,395
1783,702	53,5	3,175	28,4	20,21
1786,162	53,6	3,19	28,4	20,21
1788,572	53,4	3,16	28,4	20,11
1790,984	53,4	3,16	28,4	20,11
1793,442	53,5	3,175	28,5	20,025

1795,854	53,6	3,19	28,5	20,025
1798,314	53,5	3,075	28,5	19,925
1800,775	53,6	3,19	28,5	19,825
1803,336	53,6	3,19	28,6	19,84
1805,696	53,7	3,205	28,6	19,74
1808,206	53,7	3,205	28,6	19,84
1810,766	53,7	3,105	28,6	19,74
1813,277	53,8	3,12	28,7	19,755
1815,788	53,8	3,22	28,7	19,755
1818,349	53,8	3,12	28,7	19,655
1820,811	53,8	3,12	28,7	19,655
1823,27	53,8	3,12	28,7	19,555
1825,832	53,9	3,135	28,8	19,57
1828,291	53,9	3,135	28,8	19,47
1830,753	53,8	3,12	28,8	19,47
1833,213	53,8	3,12	28,9	19,485
1835,522	53,9	3,135	28,9	19,385
1838,32	54,1	3,165	28,9	19,385
1840,543	54	3,15	28,9	19,285
1843,104	54,1	3,165	29	19,2
1845,666	54,1	3,065	29	19,2
1848,126	54	3,15	29	19,1
1850,588	54	3,15	29,1	19,115
1853,149	54	3,15	29,1	19,015
1855,558	54	3,15	29,1	19,015
1857,968	54,1	3,065	29,2	18,93
1860,379	54,2	3,08	29,2	18,93
1862,79	54,2	3,08	29,2	18,83
1865,249	54,2	3,08	29,2	18,73
1867,66	54,3	3,095	29,3	18,745
1870,119	54,2	3,08	29,3	18,745
1872,48	54,2	3,08	29,3	18,645
1874,839	54,1	3,065	29,3	18,645
1877,401	54,1	3,065	29,4	18,56
1879,911	54,2	3,08	29,4	18,56
1882,422	54,2	3,08	29,4	18,46
1884,883	54,2	3,08	29,5	18,475
1887,343	54,3	3,095	29,5	18,475
1889,854	54,3	3,095	29,5	18,475
1892,416	54,3	3,095	29,5	18,375
1894,927	54,2	3,08	29,6	18,39
1897,387	54,3	3,095	29,6	18,29
1899,847	54,4	3,11	29,6	18,29
1902,258	54,3	3,095	29,6	18,19
1904,667	54,3	3,095	29,6	18,09
1907,129	54,4	3,11	29,7	18,105
1909,589	54,3	3,095	29,7	18,105
1911,948	54,4	3,11	29,7	18,105
1914,459	54,4	3,11	29,8	18,02
1916,92	54,4	3,11	29,8	18,02

1919,281	54,3	3,095	29,8	17,92
1921,842	54,3	3,095	29,8	17,92
1924,353	54,3	3,095	29,8	17,92
1926,863	54,3	3,095	29,9	17,935
1929,322	54,3	3,095	29,9	17,835
1931,682	54,4	3,11	29,9	17,835
1934,144	54,4	3,11	29,9	17,735
1936,555	54,3	3,095	30	17,75
1939,15	54,3	3,095	30	17,65
1941,526	54,3	3,095	30	17,65
1943,985	54,4	3,11	30	17,55
1946,345	54,3	3,095	30,1	17,565
1948,807	54,4	3,11	30,1	17,565
1951,166	54,3	3,095	30,1	17,465
1953,628	54,4	3,11	30,1	17,465
1955,987	54,4	3,11	30,1	17,465
1958,447	54,4	3,11	30,2	17,38
1960,807	54,5	3,125	30,2	17,38
1963,269	54,5	3,125	30,2	17,28
1965,677	54,5	3,125	30,2	17,28
1968,88	54,4	3,11	30,2	17,28
1970,548	54,4	3,11	30,3	17,195
1973,109	54,4	3,11	30,3	17,195
1975,671	54,4	3,11	30,3	17,195
1978,131	54,5	3,125	30,3	17,095
1980,541	54,5	3,125	30,3	17,095
1982,952	54,5	3,125	30,4	17,11
1985,412	54,6	3,14	30,4	17,11
1987,772	54,6	3,04	30,4	17,11
1990,333	54,6	3,14	30,4	17,01
1992,793	54,5	3,125	30,4	17,01
1995,303	54,5	3,125	30,4	17,01
1997,714	54,6	3,14	30,4	16,91
2000,225	54,7	3,055	30,4	16,91
2002,786	54,7	3,055	30,4	16,91
2005,297	54,7	3,055	30,5	16,825
2007,808	54,7	3,055	30,5	16,825
2010,369	54,6	3,04	30,5	16,825
2012,931	54,5	3,025	30,5	16,725
2015,339	54,6	3,04	30,5	16,725
2017,75	54,6	3,04	30,5	16,725
2020,211	54,6	3,04	30,5	16,725
2022,671	54,8	3,07	30,5	16,725
2025,182	54,7	3,055	30,5	16,725
2027,692	54,7	3,055	30,6	16,74
2030,203	54,6	3,04	30,6	16,74
2032,713	54,7	3,055	30,6	16,64
2035,275	54,7	3,055	30,6	16,64
2037,786	54,7	3,055	30,6	16,64
2040,296	54,8	3,07	30,6	16,64

2042,758	54,8	3,07	30,6	16,54
2045,166	54,9	3,085	30,6	16,54
2047,628	54,8	3,07	30,6	16,54
2050,188	54,8	3,07	30,7	16,455
2052,749	54,8	3,07	30,7	16,455
2055,21	54,9	3,085	30,7	16,455
2057,621	54,7	3,055	30,7	16,455
2060,82	54,8	3,07	30,7	16,355
2062,593	54,8	3,07	30,8	16,37
2064,951	54,8	3,07	30,8	16,37
2067,462	54,9	3,085	30,8	16,27
2070,23	54,9	3,085	30,8	16,27
2072,483	54,8	3,07	30,8	16,27
2074,945	54,8	3,07	30,9	16,185
2077,405	54,9	3,085	30,9	16,185
2079,814	54,8	3,07	30,9	16,185
2082,226	54,9	3,085	30,9	16,185
2084,635	54,9	3,085	31	16,1
2087,45	54,8	3,07	31	16,1
2089,456	54,8	3,07	31	16,1
2091,815	54,9	3,085	31	16
2094,326	55	3	31	16
2096,836	55	3	31,1	16,015
2099,298	55	3	31,1	15,915
2101,758	54,9	2,985	31,1	15,915
2104,168	54,9	3,085	31,1	15,915
2106,729	55	3	31,1	15,915
2109,24	55	3	31,1	15,815
2111,751	55	3	31,1	15,815
2114,312	55	3	31,1	15,815
2116,772	55	3	31,1	15,815
2119,232	55,1	3,015	31,1	15,815
2121,743	55,1	3,015	31,2	15,73
2124,205	55,1	3,015	31,2	15,73
2126,564	55,1	3,015	31,2	15,73
2129,75	55,1	3,015	31,2	15,73
2131,586	55,1	3,015	31,2	15,63
2134,147	55,1	3,015	31,2	15,63
2136,656	55,1	3,015	31,2	15,63
2139,167	55,2	3,03	31,3	15,645
2141,628	55,1	3,015	31,3	15,545
2144,139	55,2	3,03	31,3	15,545
2146,65	55,2	3,03	31,3	15,545
2149,61	55,2	3,03	31,3	15,545
2151,572	55,1	3,015	31,4	15,46
2154,31	55,1	3,015	31,4	15,46
2156,392	55,2	3,03	31,4	15,46
2158,903	55,2	3,03	31,4	15,46
2161,414	55,2	3,03	31,4	15,36
2163,874	55,2	3,03	31,5	15,375

2166,385	55,2	3,03	31,5	15,275
2168,844	55,2	3,03	31,5	15,375
2171,304	55,2	3,03	31,5	15,375
2173,815	55,2	3,03	31,5	15,375
2176,277	55,2	3,03	31,5	15,275
2178,738	55,2	3,03	31,5	15,275
2181,249	55,2	3,03	31,5	15,275
2183,759	55,3	3,045	31,5	15,275
2186,219	55,2	3,03	31,5	15,275
2188,73	55,3	3,045	31,6	15,19
2191,19	55,2	3,03	31,6	15,19
2193,601	55,2	3,03	31,6	15,19
2196,11	55,3	3,045	31,6	15,19
2198,521	55,4	2,96	31,6	15,09
2201,83	55,4	3,06	31,7	15,105
2203,593	55,4	2,96	31,7	15,105
2206,155	55,4	2,96	31,7	15,105
2208,666	55,3	2,945	31,7	15,105
2211,126	55,3	3,045	31,7	15,005
2213,585	55,3	3,045	31,7	15,005
2216,96	55,3	3,045	31,8	15,02
2218,657	55,3	3,045	31,8	15,02
2221,69	55,3	3,045	31,8	15,02
2223,58	55,3	3,045	31,8	14,92
2226,91	55,3	3,045	31,8	14,92
2228,5	55,3	3,045	31,8	14,92
2231,62	55,3	3,045	31,9	14,935
2233,623	55,3	3,045	31,9	14,835
2235,981	55,3	3,045	31,9	14,835
2238,443	55,3	3,045	31,9	14,835
2240,954	55,3	3,045	31,9	14,835
2243,514	55,3	3,045	31,9	14,835
2245,976	55,4	3,06	31,9	14,835
2248,436	55,3	2,945	31,9	14,735
2250,795	55,3	3,045	31,9	14,735
2253,256	55,3	3,045	32	14,75
2255,767	55,4	3,06	32	14,75
2258,76	55,4	2,96	32	14,75
2260,586	55,4	3,06	32	14,65
2263,97	55,5	2,975	32	14,75
2265,608	55,4	2,96	32	14,65
2268,69	55,4	2,96	32,1	14,665
2270,429	55,4	2,96	32,1	14,665
2272,839	55,5	2,975	32,1	14,665
2275,3	55,6	2,99	32,1	14,565
2277,659	55,5	2,975	32,1	14,565
2280,17	55,5	2,975	32,1	14,565
2282,53	55,6	2,99	32,1	14,465
2284,94	55,6	2,99	32,1	14,465
2287,4	55,6	2,99	32,1	14,465

2289,761	55,6	2,99	32,1	14,565
2292,272	55,6	2,99	32,2	14,48
2294,833	55,6	2,99	32,2	14,48
2297,292	55,6	2,99	32,2	14,38
2299,803	55,5	2,975	32,2	14,38
2302,314	55,5	2,975	32,2	14,48
2304,825	55,6	2,99	32,2	14,38
2307,336	55,6	2,99	32,2	14,38
2309,797	55,6	2,99	32,2	14,38
2312,208	55,5	2,975	32,2	14,38
2314,668	55,6	2,99	32,2	14,38
2317,229	55,6	2,99	32,2	14,38
2319,689	55,6	2,99	32,2	14,38
2322,5	55,5	2,975	32,2	14,38
2324,51	55,6	2,99	32,2	14,38
2326,92	55,6	2,99	32,2	14,38
2329,381	55,6	2,99	32,2	14,38
2331,791	55,6	2,99	32,2	14,38
2334,251	55,7	3,005	32,2	14,28
2336,711	55,6	2,99	32,2	14,28
2339,72	55,6	2,99	32,3	14,295
2341,582	55,6	2,99	32,3	14,295
2344,93	55,6	2,99	32,3	14,195
2346,604	55,7	3,005	32,3	14,195
2349,114	55,6	2,99	32,3	14,195
2351,575	55,6	2,99	32,3	14,195
2354,35	55,6	2,99	32,3	14,195
2356,497	55,5	2,975	32,4	14,11
2358,805	55,7	3,005	32,4	14,11
2361,316	55,6	2,99	32,4	14,11
2363,827	55,6	2,99	32,4	14,11
2366,339	55,6	2,99	32,4	14,01
2368,849	55,6	2,89	32,4	14,01
2371,36	55,7	2,905	32,4	14,01
2373,821	55,7	2,905	32,4	14,01
2376,23	55,7	2,905	32,5	14,025
2378,691	55,7	2,905	32,5	13,925
2381,252	55,7	2,905	32,5	13,925
2383,712	55,7	2,905	32,5	13,925
2386,72	55,7	2,905	32,5	13,925
2388,533	55,8	2,92	32,5	13,925
2390,894	55,7	2,905	32,5	13,925
2393,354	55,7	2,905	32,6	13,94
2395,763	55,7	3,005	32,6	13,94
2398,274	55,8	2,92	32,6	13,94
2400,736	55,9	2,935	32,6	13,84
2403,196	55,8	2,92	32,6	13,84
2405,606	55,8	2,92	32,6	13,74
2408,117	55,8	2,92	32,6	13,74
2410,627	55,8	2,92	32,6	13,74

2413,137	55,8	2,92	32,6	13,64
2415,599	55,7	2,905	32,6	13,64
2418,11	55,8	2,92	32,7	13,555
2420,67	55,7	2,905	32,7	13,655
2423,181	55,8	2,92	32,7	13,655
2425,592	55,8	2,92	32,7	13,655
2428,103	55,8	2,92	32,7	13,655
2430,563	55,8	2,92	32,7	13,655
2433,74	55,7	2,905	32,7	13,655
2435,534	55,8	2,92	32,7	13,655
2437,895	55,8	2,92	32,7	13,555
2440,406	55,7	2,905	32,7	13,555
2442,967	55,7	2,905	32,7	13,555
2445,376	55,7	2,905	32,7	13,555
2447,788	55,7	2,905	32,7	13,555
2450,197	55,8	2,92	32,8	13,57
2452,708	55,8	2,92	32,7	13,555
2455,168	55,8	2,92	32,7	13,555
2457,628	55,7	2,905	32,7	13,455
2460,139	55,7	2,905	32,8	13,47
2462,65	55,7	2,905	32,8	13,47
2465,211	55,7	2,905	32,8	13,47
2467,622	55,7	2,905	32,8	13,47
2469,981	55,7	2,905	32,8	13,47
2472,392	55,7	2,905	32,7	13,455
2474,853	55,7	2,905	32,8	13,47
2477,313	55,6	2,89	32,7	13,455
2479,724	55,6	2,89	32,7	13,455
2482,235	55,7	2,905	32,7	13,455
2484,644	55,7	2,905	32,8	13,47
2487,54	55,7	2,905	32,8	13,47
2489,516	55,6	2,89	32,8	13,37
2491,976	55,7	2,905	32,8	13,37
2494,437	55,7	2,905	32,8	13,37
2496,897	55,7	2,905	32,8	13,37
2499,356	55,7	2,905	32,8	13,37
2501,718	55,6	2,89	32,8	13,37
2504,177	55,6	2,89	32,8	13,37
2506,638	55,6	2,89	32,8	13,27
2509,49	55,6	2,89	32,8	13,27
2511,559	55,6	2,89	32,9	13,285
2514,2	55,6	2,89	32,9	13,285
2516,531	55,6	2,89	32,9	13,285
2518,94	55,7	2,905	32,9	13,285
2521,451	55,7	2,905	32,9	13,285
2524,12	55,6	2,89	32,9	13,185
2526,573	55,6	2,89	32,9	13,185
2529,34	55,6	2,89	32,9	13,185
2531,445	55,6	2,89	32,9	13,185
2533,905	55,7	2,905	32,9	13,185

2536,314	55,7	2,905	32,9	13,185
2538,775	55,7	2,905	32,9	13,185
2541,287	55,7	2,905	33	13,1
2543,748	55,7	2,905	32,9	13,085
2546,157	55,7	2,905	33	13,1
2548,618	55,7	2,905	33	13,1
2551,77	55,7	2,905	33	13,1
2553,539	55,7	2,905	33	13,1
2555,949	55,8	2,92	33	13,1
2558,51	55,7	2,905	33	13,1
2561,2	55,7	2,905	33	13,1
2563,431	55,7	2,905	33	13
2565,893	55,7	2,905	33	13
2568,352	55,8	2,92	33	13
2570,863	55,8	2,92	33	13
2573,374	55,7	2,905	33	13
2575,885	55,8	2,92	33	13
2578,245	55,8	2,92	33	12,9
2580,656	55,7	2,905	33	12,9
2582,965	55,6	2,89	33,1	12,915
2585,374	55,7	2,905	33,1	12,915
2587,736	55,7	2,905	33,1	12,915
2590,297	55,7	2,905	33,1	12,915
2592,706	55,7	2,905	33,1	12,915
2595,166	55,7	2,905	33,1	12,915
2597,626	55,7	2,905	33,1	12,915
2600,187	55,6	2,89	33,1	12,815
2602,648	55,6	2,89	33,1	12,815
2605,6	55,6	2,89	33,1	12,815
2607,57	55,6	2,89	33,1	12,815
2610,3	55,6	2,89	33,1	12,815
2612,49	55,6	2,89	33,1	12,815
2614,95	55,7	2,905	33,1	12,815
2617,412	55,7	2,905	33,2	12,83
2619,923	55,7	2,905	33,2	12,83
2622,384	55,7	2,905	33,2	12,73
2624,743	55,7	2,905	33,2	12,73
2627,253	55,7	2,905	33,2	12,73
2629,664	55,7	2,905	33,2	12,73
2632,175	55,7	2,905	33,2	12,73
2634,635	55,7	2,905	33,3	12,645
2637,146	55,7	2,905	33,3	12,645
2639,656	55,8	2,92	33,3	12,645
2642,117	55,8	2,92	33,3	12,645
2644,579	55,9	2,935	33,3	12,645
2646,988	55,9	2,835	33,3	12,645
2649,398	55,9	2,835	33,3	12,645
2651,959	55,9	2,835	33,3	12,645
2654,47	55,9	2,835	33,3	12,645
2657,31	56	2,85	33,3	12,645

2659,593	55,8	2,82	33,3	12,645
2662,52	55,9	2,835	33,2	12,63
2664,513	55,9	2,835	33,2	12,63
2666,925	55,8	2,82	33,2	12,63
2669,385	55,9	2,835	33,2	12,63
2671,844	55,9	2,835	33,2	12,63
2674,355	56	2,85	33,2	12,63
2676,716	56	2,85	33,2	12,63
2679,126	56	2,85	33,2	12,63
2681,487	56,1	2,865	33,2	12,63
2683,998	56,2	2,78	33,2	12,63
2686,458	56,2	2,78	33,2	12,63
2688,968	56,1	2,765	33,1	12,615
2691,53	56,2	2,78	33,1	12,615
2693,989	56,2	2,78	33,1	12,615
2696,45	56,1	2,765	33,1	12,715
2699,11	56,1	2,765	33,1	12,615
2701,471	56,2	2,88	33,1	12,615
2703,883	56,2	2,78	33,2	12,63
2706,394	56,2	2,78	33,2	12,63
2708,803	56,2	2,78	33,2	12,63

Додаток Б

Розрахунок економічного ефекту від впровадження розробленої системи керування.

Перелік основного обладнання, необхідного для виробництва зерносушарки

Обладнання	Кількість	Ціна за одиницю	Загальна ціна
Програмований логічний контролер	1	30000	30000
Частотний перетворювач UNIDRIVE M200 11.00кВт 3-ф/380	1	29463	29463
Персональний комп'ютер	1	10000	10000
Датчики температури	5	5000	25000
Датчики вологості	4	32000	128000
Промисловий вентилятор В2,3-130-8	1	22619	22619
Нагрівач AEROSTAR SEN 90-50/90	1	22477	22477
Сушильна камера	1	50000	50000
Всього:			202359

Затрати на придбання комплектуючих:

$$З_k = 202359 \text{ (грн.)}$$

Визначення витрат на заробітну плату з нарахуваннями для впровадження системи автоматичного керування.

Для впровадження розробленої системи керування необхідно виконати роботи по встановленню та налагодженню апаратної та програмної частини. Вказані роботи будуть проводити два слюсарі IV розряду, два слюсарі V розряду, один слюсар VI розряду та один ІТР протягом п'яти робочих змін.

Витрати на заробітну плату з нарахуваннями визначаємо за формулою:

$$S_{зпм} = K_{нз} \cdot \lambda \cdot t \cdot \sum_{i=1}^m C_{ti} (1 + H),$$

де $K_{нз}$ — коефіцієнт, який враховує накладні витрати на заробітну плату, $K_{нз} = 1,3$;

λ — коефіцієнт, який враховує премії, $\lambda = 1,25$;

t — час виконання робіт, год.;

C_{ti} — часова тарифна ставка працівника i -го розряду;

H — норма нарахування на заробітну плату у вигляді ЄСВ, $H = 22 \%$;

m — кількість робітників, чол.

Значення годинних тарифних ставок: часова тарифна ставка слюсаря IV розряду складає 32,01 грн./год.; слюсаря V розряду — 35,56 грн./год.; слюсаря VI розряду — 32,01 грн./год.; часова тарифна ставка інженерно-технічного робітника складає 42,05 грн./год.

$$S_{зпм} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 40 \cdot (1 + 0,22) \cdot (32,01 \cdot 2 + 35,56 \cdot 2 + 38,02 + 42,05) = 17070 \text{ грн.}$$

Таким чином, витрати на встановлення системи керування складають 17070 грн.

Визначення загальної суми витрат на створення нової зерносушарки.

Витрат на створення нової зерносушарки визначаються як сума витрат на купівлю комплектуючих та витрати на заробітну плату з нарахуваннями робітникам, що працюють:

$$Z_M = Z_K + Z_{ЗПМ}$$

$$Z_M = 202359 + 17070 = 219400 \text{ грн.}$$

Розрахунок річного фонду часу роботи.

Розрахунок річного фонду часу роботи зерносушарки, що експлуатується зараз та зерносушарки, яка розробляється:

$$T_P = \frac{T_\Phi}{\frac{1}{t_{зМ} \cdot K_{зМ}} + D_P}$$

де T_Φ — річний фонд робочого часу, $T_\Phi = 90$ днів;

$t_{зМ}$ — тривалість зміни в машиногодинах, $t_{зМ} = 8$;

$K_{зМ}$ — коефіцієнт змінності роботи устаткування, $K_{зМ} = 3$;

D_P — простої в машино-днях у всіх видах технічного обслуговування і ремонту, який приходить на одну машиноgodину, визначаємо за формулою:

$$D_P = \frac{\sum_{i=1}^n d_{pi} \cdot a_{pi}}{T_{Ц}}$$

де n — число різновидів технічних обслуговувань та ремонтів за міжремонтний період, $n = 3$;

d_{pi} — тривалість перебування в i -му ремонті або технічному обслуговуванні;

a_{pi} — кількість ремонтів або технічних обслуговувань за міжремонтний період;

$T_{Ц}$ — час міжремонтного циклу, $T_{Ц} = 24 \cdot 365 = 8760$ год.

Технічне обслуговування та ремонт обладнання

Вид технічного обслуговування, ремонту	Кількість технічних обслуговувань та ремонтів в одному ремонтному циклі (a_{pi})	Тривалість одного технічного обслуговування та ремонту, роб. днів (d_{pi})	Трудомісткість виконання одного технічного обслуговування й ремонту, нормо.-год. (r_i)
Для базової зерносушарки			
ТО	10	0,5	8
ПР	12	1	18
КР	1	2	256
Для зерносушарки, що розробляється			
ТО	10	0,5	8
ПР	6	1	18
КР	1	2	192

Простої у всіх видах ТО та ремонту:

- для базової зерносушарки

$$D_p^b = \frac{10 \cdot 0,5 + 12 \cdot 1 + 1 \cdot 2}{8760} = 0,0022 \left(\frac{\text{маш. - днів}}{\text{маш. - год.}} \right)$$

- для зерносушарки, що розробляється

$$D_p^m = \frac{10 \cdot 0,5 + 6 \cdot 1 + 1 \cdot 2}{8760} = 0,0015 \left(\frac{\text{маш. - днів}}{\text{маш. - год.}} \right)$$

Річний фонд часу роботи:

- для базової зерносушарки

$$T_p^b = \frac{90}{\frac{1}{8 \cdot 3} + 0,0022} = 2053 \text{ (год.)}$$

- для зерносушарки, що розробляється

$$T_p^m = \frac{90}{\frac{1}{8 \cdot 3} + 0,0015} = 2086 \text{ (год.)}$$

Розрахунок річної експлуатаційної продуктивності.

Річна експлуатаційна продуктивність визначається за формулою:

$$B = B_{\text{Е.Г.П}} \times T_p \times K_{\text{ПР}}$$

де $V_{\text{Е.Г.П}}$ – годинна експлуатаційна продуктивність, (од. прод./год),
 $K_{\text{ПР}}$ – коефіцієнт, що враховує простой, не враховані в часовій експлуатаційній продуктивності.

Таким чином, річна експлуатаційна продуктивність:

- для базової зерносушарки:

$$V_6 = 32 \times 2053 \times 0,9 = 59130 \text{ (од. прод./рік)}$$

- для зерносушарки, що розробляється:

$$V_M = 39,2 \times 2086 \times 0,9 = 73580 \text{ (од. прод./рік)}$$

Визначення поточних річних затрат в процесі експлуатації зерносушарки

Розрахунок заробітної платні з нарахуваннями.

Заробітна плата працівників, що приймають участь в експлуатації зерносушарки визначається за формулою:

$$S_{\text{ЗП}} = K_{\text{НЗ}} \cdot \lambda \cdot t \cdot \sum_{i=1}^m C_{ti} (1 + H),$$

Обслуговуючий персонал базової зерносушарки становив 3 робітники 5-го розряду, для зерносушарки, що розробляється - 3 робітники 4-го розряду.

Витрати на заробітну плату за рік складають:

- для базової зерносушарки:

$$S_{\text{ЗПБ}} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 8760 \cdot 3 \cdot 35,56 \cdot (1 + 0,22) = 1235000 \text{ (грн.)}$$

- для зерносушарки, що розробляється:

$$S_{\text{ЗПМ}} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 8760 \cdot 3 \cdot 32,02 \cdot (1 + 0,22) = 1112000 \text{ (грн.)}$$

Визначення витрат на технічне обслуговування і поточний ремонт зерносушарки.

Витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт системи діагностики МПС визначимо за формулою:

$$S_{\text{ТО}} = S_{\text{ТОЗ}} + S_{\text{ТОМ}}$$

де $S_{\text{ТОЗ}}$ – витрати на заробітну плату ремонтників з нарахуваннями;

$S_{\text{ТОМ}}$ – витрати на матеріали та запасні частини.

Витрати на заробітну плату ремонтних робітників з нарахуваннями визначаються за формулою:

$$S_{\text{ТОЗ}} = \frac{T_{\text{Р}}}{T_{\text{Ц}}} \cdot K_{\text{НЗ}} \cdot \lambda \cdot C_{\text{Р}} \cdot \sum_{i=1}^m a_{\text{Рi}} \cdot \text{ч}_{\text{Рi}} \cdot (1 + H)$$

де $C_{\text{Р}}$ – середня тарифна ставка ремонтного робітника, що обслуговують систему, грн/год;

$a_{\text{Рi}}$ – кількість техобслуговування і поточних ремонтів без капітального ремонту;

$\text{ч}_{\text{Рi}}$ – трудоемкість і-го технічного обслуговування та поточного ремонту.

Витрати на матеріали та запасні частини визначаються за формулою:

$$S_{\text{ТОЗ}} = K_{\text{ІП}} \cdot \frac{S_{\text{ТОЗ}} \cdot (1 - H)}{K_{\text{НЗ}}} \cdot K_{\text{ЗР}}$$

де $K_{\text{ІП}}$ – норма накладних розходів по всім видам витрат, крім заробітної плати, $K_{\text{ІП}}=1,1$;

$K_{\text{ЗР}}$ – коефіцієнт переходу від витрат на заробітну плату до витрат на матеріали та запасні частини, $K_{\text{ЗР}} = 1,25$.

І до, і після модернізації технічне обслуговування і поточний ремонт системи проводять 3 робітника 4-го розряду. Таким чином, витрати на заробітну плату ремонтних робітників дорівнюють:

- для базової зерносушарки:

$$S_{\text{ЗП}}^{\text{б}} = \frac{2053}{8760} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 3 \cdot \frac{32,01}{1,05} \cdot (10 \cdot 8 + 12 \cdot 18)(1 + 0,22) = 12580 \text{ (грн.)}$$

- для зерносушарки, що розробляється:

$$S_{\text{ЗП}}^{\text{м}} = \frac{2086}{8760} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 3 \cdot \frac{32,01}{1,05} \cdot (10 \cdot 8 + 6 \cdot 18)(1 + 0,22) = 8116 \text{ (грн.)}$$

Відповідно витрати на матеріали та запасні частини:

- для базової зерносушарки:

$$S_{\text{ТОМ}}^{\text{баз}} = 1,1 \cdot \frac{12580 \cdot (1 - 0,22)}{1,3} \cdot 1,25 = 10380 \text{ (грн.)}$$

- для зерносушарки, що розробляється:

$$S_{\text{ТОМ}}^{\text{М}} = 1,1 \cdot \frac{8116 \cdot (1 - 0,22)}{1,3} \cdot 1,25 = 6696 \text{ (грн.)}$$

Таким чином, витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт складають:

- для базової зерносушарки:

$$S_{\text{ТОБ}} = 12580 + 10380 = 22960 \text{ (грн.)}$$

- для зерносушарки, що розробляється:

$$S_{\text{ТОМ}} = 8116 + 6696 = 14810 \text{ (грн.)}$$

Визначення витрат на електроенергію.

Величину витрат на електроенергію визначаємо за формулою:

$$S_{\text{ЕЛ}} = K_m \cdot W_{\text{ЕЛ}} \cdot C_{\text{ЕЛ}} \cdot T_p$$

де $C_{\text{ЕЛ}}$ – ціна 1 кВт/год електроенергії, становить 2,68 грн за 1 кВт/год;

$W_{\text{ЕЛ}}$ – витрата за годину енергії, кВт/год.

Відповідно, річні витрати на газ для базової зерносушарки становлять:

$$S_{\text{газ}}^{\text{б}} = 1,1 \cdot 14,28 \cdot 29,44 \cdot 2053 = 949500 \text{ (грн.)}$$

Для зерносушарки, що розробляється, витрати на електроенергію складають:

$$S_{\text{ЕЛ}}^{\text{М}} = 1,1 \cdot 172,2 \cdot 2,68 \cdot 2086 = 1059000 \text{ (грн.)}$$

Розрахунок загальної суми річних витрат.

Сума річних витрат

Найменування статті витрат	Величина витрат, грн	
	для базової зерносушарки	для зерносушарки, що розробляється
ЗП з нарахуванням	1235000	1112000

ТО і ПР	22960	14810
Електроенергія	949500	1059000
Всього	2208000	2185000

Розрахунок вартості машино-годин роботи зерносушарки

Розрахунок вартості машино-годин зерносушарки розраховуємо за формулою:

$$S_{\text{МГ}} = \frac{S}{T_P}$$

- для базової зерносушарки вартість однієї машино-години складала:

$$S_{\text{МГ}}^{\text{б}} = \frac{2208000}{2053} = 1075 \text{ (грн./год.)}$$

- для зерносушарки, що розробляється вартість однієї машино-години змінилась і складає:

$$S_{\text{МГ}}^{\text{м}} = \frac{2185000}{2086} = 1048 \text{ (грн./год.)}$$

Розрахунок вартості технологічної операції для одиниці продукції

Вартість технологічної операції для одиниці продукції визначається за формулою:

$$S_{\text{П}} = \frac{S}{B}$$

- для базової зерносушарки вартість складала:

$$S_{\text{П1}} = \frac{2208000}{59130} = 37,334 \text{ (грн.)}$$

- для зерносушарки, що розробляється вартість складає:

$$S_{\text{П2}} = \frac{2185000}{73580} = 29,7 \text{ (грн.)}$$

Визначення економічного ефекту від проведення модернізації

Річний економічний ефект для зерносушарки, що розробляється визначається за формулою:

$$E = (S_{П1} - S_{П2}) \times B$$

$$E = (37,334 - 29,7) \times 73580 = 561700 \text{ (грн./рік)}$$

Термін окупності витрат по модернізації розраховуємо за формулою:

$$T = \frac{Z_M}{E}$$

$$T = \frac{219400}{561700} = 0,391 \text{ (року)}$$

Якщо перевести 0,391 року у місяці, то отримаємо 5 місяців.

Висновки

- витрати на створення зерносушарки склали 219400 грн.;
- витрати на заробітну плату робітників, які експлуатують зерносушарку зменшились на 10 %;
- витрати на ТО і ПР зменшились на 35,5 %;
- вартість машино-години роботи знижена на 2,5 %;
- вартість технологічної операції для одиниці продукції знижена на 20,45 %;
- економічний ефект склав 561700 гривень на рік;
- термін окупності витрат склав 5 місяців.

Додаток В

АКТ

ПРО РЕЗУЛЬТАТИ ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВОЇ РОЗРОБКИ

«23» січня 2019 р.

смт. Шишаки

За технічною документацією розробленою старшим викладачем Захарченком Р.В. на кафедрі автоматики та електроприводу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка виготовлено дослідний зразок зерносушарки.

Проведені дослідні сушіння зерна підтверджують технологічну ефективність установки за рахунок використання розробленої системи автоматичного керування. Якість просушеного зерна відповідає нормативним вимогам.

Установка рекомендована до впровадження на зерносушильних комплексах та елеваторах.

Директор

ТОВ «Шишацький комбікормовий завод»



В.А. Бойко

Рис. В.1 Акт про результати впровадження наукової розробки на ТОВ «Шишацький комбікормовий завод»

ЗАТВЕРДЖУЮ



Перший проректор – проректор з
науково-педагогічної роботи
Полтавського національного технічного
університету імені Юрія Кондратюка
доктор технічних наук, доцент

Б.О. Коробко

" 11 " _____ 2019 року

АКТ

**реалізації матеріалів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук Захарченка Руслана Володимировича**

Цей акт складено комісією: голова комісії – завідувач кафедри автоматики і електроприводу, доктор технічних наук, доцент Шефер О.В.

Члени комісії – заступник завідувача кафедри автоматики і електроприводу, кандидат технічних наук, доцент Галай В.М., доцент кафедри автоматики і електроприводу, кандидат фізико-математичних наук, доцент Борщ В.В. в тому, що результати дисертаційної роботи, а саме:

- автономна адаптивна система керування процесом сушіння зернових культур, яка забезпечує оптимальні режими в умовах невизначеності та нестационарності параметрів об'єкта і середовища;

- метод конфлюентного аналізу в умовах зашумленості вхідних і вихідних сигналів для отримання незміщених та ефективних оцінок параметрів передавальних функцій об'єкта керування

- застосування ідентифікації і розв'язки каналів керування для побудови функціонально надійної адаптивної систему стабілізації оптимальних значень температури і вологості зерна в умовах неконтрольованих параметричних і сигнальних збурень

реалізовані в навчальному процесі кафедри автоматики і електроприводу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка, при викладанні навчальних дисциплін: теорія автоматичного керування, моделювання електромеханічних систем, основи автоматизованого проектування електротехнічних пристроїв та електромеханічних систем, а також під час виконання магістерських кваліфікаційних робіт та курсового проектування.

Голова комісії

д.т.н., доцент

О.В. Шефер

Члени комісії:

к.т.н., доцент

В.М. Галай

к.ф.-м.н., доцент

В.В. Борщ

Рис. В.2 Акт реалізації матеріалів дисертаційної роботи у навчальний процес на кафедрі автоматики і електроприводу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора з навчальної
роботи Полтавського коледжу харчових
технологій Національного університету
харчових технологій



О.А. Дарюга
2019 року

АКТ

реалізації у навчальному процесі Полтавського коледжу харчових технологій Національного університету харчових технологій результатів досліджень отриманих у дисертаційній роботі за науковою спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування здобувача наукового ступеня кандидата технічних наук Захарченка Руслана Володимировича на тему “Автоматизована система керування процесом сушіння зернових культур”

Комісія в складі: голови комісії – голова циклової комісії спеціальності «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології», викладач-методист Примаченко О.І. та членів комісії – викладач вищої категорії Петров С.А. та викладач-методист Павленко М.І. провела роботу зі встановлення фактичного використання в навчальному процесі Полтавського коледжу харчових технологій Національного університету харчових технологій, результатів дисертаційної роботи Захарченка Руслана Володимировича.

На основі представлених матеріалів дисертаційної роботи та наукових публікацій комісія встановила, що в навчальному процесі використовуються наступні результати:

–математична модель процесу сушіння з розподіленими і зосередженими параметрами, відносно вимірювальної системи;

– спрощена система автономного керування каналами температури та вологості зерна, яка з необхідною точністю забезпечує процес сушіння, завдяки незміщеності та ефективності отриманих оцінок параметрів об’єкта та методів редукції складних передавальних функцій;

–адаптивна система стабілізації оптимальних значень температури і вологості зерна в умовах неконтрольованих параметричних і сигнальних збурень завдяки ідентифікації та розв’язки каналів керування.

Рис. В.3 Перший аркуш акта реалізації у навчальному процесі Полтавського коледжу харчових технологій Національного університету харчових технологій результатів досліджень отриманих у дисертаційній роботі

На основі аналізу наданих матеріалів комісія встановила, що отримані наукові результати дисертаційної роботи та опубліковані фахові статті Захарченка Р.В. використовуються в навчальному процесі Полтавського коледжу харчових технологій Національного університету харчових технологій у курсовому та дипломному проектуванні, а також під час викладання навчальних дисциплін: «Основи метрології і засоби технологічного контролю», «Теорія автоматичного регулювання та автоматичні регулятори» і «Автоматизація технологічних процесів».

Голова комісії,
викладач-методист

 О.І. Примаченко

Члени комісії:

викладач вищої категорії

 С.А. Петров

викладач-методист

 М.І. Павленко

Рис. В.4 Другий аркуш акта реалізації у навчальному процесі Полтавського коледжу харчових технологій Національного університету харчових технологій результатів досліджень отриманих у дисертаційній роботі

Додаток Г
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ
ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Захарченко Р.В. Аналіз режимів сушки на основі математичної моделі / Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2015. – Випуск 3(35). – С. 83 – 84.

2. Захарченко Р.В. Моделювання процесу теплообміну через елементарний шар зерна / Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2016. – Випуск 2(38). – С. 38 – 40. (стаття індексується наукометричними базами даних Index Copernicus, General Impact Factor, Academic Resource Index та Scientific Indexed Service)

3. Захарченко Р.В. Аналіз багатовимірних систем за допомогою масиву відносних коефіцієнтів підсилення / Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2016. – Випуск 3(39). – С. 20 – 23. (стаття індексується наукометричними базами даних Index Copernicus, General Impact Factor, Academic Resource Index та Scientific Indexed Service)

4. Захарченко Р.В. Розв'язане керування багатовимірними системами / Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2016. – Випуск 4(40). – С. 18 – 20. (стаття індексується наукометричними базами даних Index Copernicus, General Impact Factor, Academic Resource Index та Scientific Indexed Service)

5. Захарченко Р.В. Дослідження інтегрованого методу ідентифікації / А.М. Сільвестров, Г.І. Кривобока, Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний

університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2017. – Випуск 2(42). – С. 55 – 56. (стаття індексується наукометричними базами даних Index Copernicus, General Impact Factor, Academic Resource Index та Scientific Indexed Service)

6. Zaharchenko R.V. Research integrated identification method / A.M. Silvestrov, G.I. Kryvoboka, R.V. Zaharchenko // Electronics and Control Systems. Kyiv: NAU, 2017. – no. 1(51). – P. 88–90. (стаття індексується наукометричними базами даних Russian science citation index, CrossRef Indexing, та Ulrich's Periodicals Directory)

7. Захарченко Р.В. Методи зберігання зернових культур з автоматичним підтриманням необхідних параметрів / А.М. Сільвестров, О.В. Шульга, Р.В. Захарченко // Тези 66-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 15 квітня – 15 травня 2014 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2014. – Т. 1. – С. 45 – 47.

8. Захарченко Р.В. Дослідження засобів захисту зерна від шкідливих захворювань у елеваторах за допомогою автоматичного контролю кліматичних характеристик / А.М. Сільвестров, О.В. Шульга, Р.В. Захарченко // Тези 66-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 15 квітня – 15 травня 2014 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2014. – Т. 1. – С. 47 – 48.

9. Захарченко Р.В. Аналіз режимів сушки зерна на основі математичної моделі / Р.В. Захарченко // Тези 68-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 19 квітня – 13 травня 2016 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2016. – Т. 1. – С. 47 – 49.

10. Захарченко Р.В. Опис процесу теплообміну у шарі зерна / Р.В. Захарченко // Тези II Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика». (Полтава, 17 листопада 2016 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2016. – С. 44 – 46.

11. Захарченко Р.В. Керування багатовимірними системами за допомогою розв'язуючих мереж / О.В. Шульга, Р.В. Захарченко // Збірник наукових праць за матеріалами IX Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми й

перспективи розвитку академічної та університетської науки». (Полтава, 7-9 грудня 2016 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2016. – С. 246 – 250.

12. Захарченко Р.В. Застосування розв'язуючих мереж при розв'язанні контурів багатовимірних систем / Р.В. Захарченко // Тези восьмої міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації». Державний університет телекомунікацій. – Київ, 11 – 12 квітня 2017 р. – С. 174.

13. Захарченко Р.В. Дослідження інтегрованого методу ідентифікації / Р.В. Захарченко // Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства». КрНУ ім. Михайла Остроградського. – Кременчук, 20-21 квітня 2017 р. – С. 90.

14. Захарченко Р.В. Моделювання інтегрованого методу ідентифікації в середовищі MATLAB / А.М. Сільвестров, Р.В. Захарченко // Тези 69-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 19 квітня – 19 травня 2017 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2017. – Т. 1. – С. 3 – 4.

15. Zaharchenko R.V. Research integrated identification method for the work of grain dryer / A.M. Silvestrov, G.I. Kryvoboka, R.V. Zaharchenko // The development of technical science: problems and solutions. Proceedings of the international research and practical conference. – The Czech Republic, Brno. – April 27 – 28, 2018. – pp. 105-108.