

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ЧЕРЬОПКІН ЄВГЕНІЙ СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 681.51:676.2.026.5

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ ПРОГРІВАННЯМ**  
**ПАПЕРОВОГО ПОЛОТНА У СУШИЛЬНІЙ ЧАСТИНІ ПАПЕРОРІБНОЇ**  
**МАШИНИ**

05.13.07 - Автоматизація процесів керування

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

\_\_\_\_\_ Є. С. Черьопкін

Науковий керівник: Жученко Анатолій Іванович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2017

## АНОТАЦІЯ

*Черьопкін Є. С.* Автоматизація процесів керування прогріванням паперового полотна в сушильній частині папероробної машини. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 “Автоматизація процесів керування” - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2017.

Дисертація присвячена питанням підвищення ефективності процесу сушіння паперового полотна на папероробній машині шляхом створення системи автоматизації процесів керування його прогрівання як визначального етапу сушіння з точки зору якості готової продукції, ресурсо- та енергозбереження.

В роботі розглянуто процес виробництва паперу на папероробних машинах різної конструкції. Проаналізовано кожний з технологічних процесів і виділено його особливості як об'єкту автоматично керування.

Проведено параметричний аналіз всіх технологічних етапів виробництва на папероробній машині на основі якого було отримано інформацію про основні вхідні та вихідні параметри, визначено збудувальні та керувальні впливи.

На основі проведеного аналізу встановлено ключову роль процесу сушіння як основної стадії з точки зору параметрів якості готової продукції і потенціалу для підвищення ефективності ресурсо- та енергозбереження. Базуючись на даних з літературних джерел досліджено існуючі рішення в області математичного моделювання і систем керування сушильною частиною і виділені їх недоліки.

Визначено недостатній розгляд питання керування процесом прогріванням паперового полотна, як першого і багато в чому визначального етапу процесу сушіння. Проаналізовано основні його особливості та завдання.

Для розробки математичної моделі процесу прогрівання паперового полотна в сушильній частині папероробної машини було проведено аналіз фізико-хімічних процесів, які протікають під час проходження паперового полотна по сушильним

циліндрах і ділянкам вільного ходу за низьких температур, що відповідає особливостям даного етапу сушіння.

Запропоновано математичну модель процесу прогрівання паперового полотна на основі рівнянь тепло- і масопереносу і нестационарної теплопровідності з урахуванням геометричних особливостей сушильної частини і властивостей паперового полотна. Окремо виділено дві математичні моделі, для контактної і конвективного сушіння.

Для перевірки розробленої математичної моделі на адекватність реальному технологічному процесу було отримано данні по температурі паперу на виході з перших 8-ми сушильних циліндрів та ділянок вільного руху з діючої папероробної машини і виконані відповідні розрахунки на розробленій математичній моделі. В якості паперу для дослідження було використано офсетний папір. Перевірка на адекватність математичної моделі була проведена з використанням статистичних критеріїв Стьюдента та Фішера.

Порівнявши розрахункові значення критерію Стьюдента та Фішера для всіх точок масивів експериментальних температур та отриманих за математичною моделлю з табличним, зроблено висновок, що немає підстав відхиляти гіпотезу про адекватність математичної моделі прогрівання паперового полотна. Тому вважається, що математична модель адекватно описує технологічний процес прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини.

З метою зручності подальшого використання розробленої математичної моделі для синтезу системи керування процесом прогрівання паперового полотна в сушильній частині папероробної машини її було представлено у вигляді системи різницевих рівнянь, що включають в себе розрахунок температури граничного шару паперового полотна на виході з сушильного циліндру, в кінці ділянки вільного руху та розрахунок температури центрального шару паперового полотна.

Обрано критерій якості оптимального управління які полягає в знаходженні таких керувальних впливів (витрата пара в сушильні циліндри), при яких буде відбуватися мінімізація відхилення реальної температури паперового полотна на виході з кожного сушильного циліндра від заданого значення.

Проведено дослідження взаємозв'язку між керувальними впливами і параметрами якості продукції. Сформовано обмеження на параметри якості готової продукції та керувальні дії.

Для розрахунку величини запропонованого критерію оптимального керування перш за все необхідно володіти інформацією про завдання по температурі на виході з кожного сушильного циліндра і ділянки вільного руху. Більш того, в умовах надзвичайно швидкого протікання процесу і зміни великої кількості технологічних параметрів постає задача отримання динамічно змінюваного оптимального температурного графіка прогрівання паперового полотна, що буде враховувати особливості протікання технологічного процесу.

В той же час, реалізація поставленої задачі має враховувати необхідність якнайшвидшого доведення температури паперу до заданого значення (закінчення процесу прогрівання). Однак, оскільки папір відноситься до капілярно-пористих колоїдних тіл, тому при різкому підвищенні температури відбуваються незворотні процеси руйнування внутрішньої структури, що веде до значного погіршення якісних показників. Це також призводить до забруднення поверхні сушильних циліндрів і різко знижує ККД сушіння.

З метою отримання даних про завдання по температурі паперового полотна на виході з кожного сушильного циліндру необхідно володіти оптимальним температурним графіком прогрівання паперового полотна.

На основі аналізу літературних даних і експериментальних досліджень розроблено алгоритм розрахунку оптимального температурного графіка прогрівання паперового. Отриманий алгоритм був покладений в основу розробленого спеціального прикладного програмного забезпечення для коригування завдання управління в режимі реального часу відповідно до отримуваних показань з датчиків встановлених на об'єкті керування.

На основі класичної слідкувальної системи автоматичного керування розроблено систему керування процесом прогрівання паперового полотна в сушильній частині папероробної машини. Проведено дослідження різних конфігурацій блоку управління на основі регулятора із застосуванням методу

динамічного програмування, ПДД-регулятора з алгоритмом автонастройки, ПДД-регуляторів зі змінними межами об'єкта управління та їх можливі комбінації.

Ефективність розроблених рішень перевірялася на об'єкті управління при впровадженні в нього генератора збурювальних впливів. З метою реалізації селективної системи управління за величиною збурюючого впливу, в системі був налаштований блок визначення оцінки збурення і проведено дослідження якості його роботи.

В рамках дослідження, проведено порівняльний аналіз внутрішньої структури блоку керування різних конфігурацій: регулятор на основі методу динамічного програмування (за наявності та відсутності збурень); один ПДД-регулятор з алгоритмом автоналаштування параметрів (за наявності збурень); три ПДД-регулятори зі змінними межами об'єкта керування з автоналаштуванням; комбінована структура: метод динамічного програмування + ПДД-регулятори зі змінними межами об'єкта керування з автоналаштуванням.

Проаналізувавши отримані дані, про роботу системи керування, зроблено практичні висновки. З одного боку, використання конфігурації блоку регулювання у вигляді трьох ПДД-регуляторів зі змінною структурою об'єкта керування є найбільш ефективним для керування процесом з високим рівнем збурювальних впливів. З іншого боку, регулятор на основі методу динамічного програмування показав високу ефективність роботи за невеликих збурень та має більшу швидкодію у порівнянні з ПДД-регуляторами

Проведені дослідження показали що найбільшу ефективність має комбінована конфігурація з селективним керуванням. Залежно від рівня збурюючих впливів в системі управління буде переходити на блок регулятора з використанням методу динамічного програмування або на блок з трьома ПДД-регуляторами зі змінними межами об'єкта управління.

Оскільки технологічний процес прогрівання паперового полотна відбувається за швидкості руху паперового полотна до 600 м/хв, то навіть за незначний проміжок часу роботи системи за не оптимального керування, можна отримати велику кількість паперу незадовільної якості. Для запобігання таких випадків при роботі

розробленої системи керування, на основі розрахованого масиву керувальних впливів пропонується виконувати їх перевірку за допомогою розробленої математичної моделі. Для оперативності роботи системи було реалізовано математичне моделювання з коефіцієнтом прискорення, що з використанням сучасного рівня комп'ютерної техніки може спричинити незначну затримку у оперативності керування. У той же час, такий підхід надає можливість без втручання у сам технологічний процес, перевірити якість запропонованого керування та у випадку незадовільного результату повернути інформацію до блоку ПД-регуляторів для переналаштування параметрів його роботи та отримання нових, покращених значень керувальних впливів.

Запропоноване технічне рішення дає змогу пришвидшити роботу системи оптимального керування шляхом запобігання перерахунку параметрів налаштування ПД-регуляторів на кожній ітерації розрахунку, а тільки за незадовільних даних, отриманих за результатами математичного моделювання.

**Ключові слова:** папероробна машина, сушильна частина, математичне моделювання, прогрівання паперового полотна, критерій якості керування, система керування.

#### **Список опублікованих праць за темою дисертації**

1. Жученко А. І., Керування процесом прогрівання паперового полотна на основі методу динамічного програмування / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Технологический аудит и резервы производства. Vol 6, No 7(26) (2015) Scientific outcomes 2015. – С. 6 – 10 (*Індексується та реферується наукометричними базами Index Copernicus, Bielefeld Academic Search Engine, Directory of Research Journals Indexing, Open Academic Journals Index, PИИЦ, WorldCat*). *Здобувачем створено структуру системи керування на основі блоку аналізу рівня збурювальних впливів у системі, розроблено метод керування нелінійними процесами з використання методу динамічного програмування;*

2. Черёпкин Е. С. Постановка задачи оптимального управления процессом прогрева бумажного полотна в сушильной части бумажодельательной машины. / Жученко А. И., Черёпкин Е. С. // Автоматизация промышленных і бізнес процесів. –

О.: 2015 – № 22. – С. 25 – 31 (*Індексується та реферується наукометричними базами EBSCO, Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського, Асоціації «УРАH», Directory of Research Journal Indexing (DRJI), Open Academic Journal Indexing (OAJI), Directory of Open Access Journals (DOAJ), Index Copernicus International, PИHЦ, WorldCat* ). *Здобувачем побудована, на основі експериментальних даних, функціональних залежностей між параметрами якості паперового полотна і керувальними впливами;*

3. Черьопкін Є. С. Параметричний аналіз папероробної машини як об'єкта автоматичного керування. / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Технологический аудит и резервы производства. – Х.: 2014. – С. 81 – 86 (*Індексується та реферується наукометричними базами Index Copernicus, Bielefeld Academic Search Engine, Directory of Research Journals Indexing, Open Academic Journals Index, PИHЦ, WorldCat*). *Здобувачем проведено аналіз роботи відомих приладів для вимірювання температури паперового полотна у сушильній частині папероробної машини, пошук недоліків відомих засобів вимірювання, розробка приладу;*

4. Жученко А. І. Реалізація алгоритму розрахунку прогрівання паперового полотна. / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – К.: НТУУ «КПІ». –2015. – №1 (13). – С. 88 – 91. *Здобувачем розроблено програмне рішення для реалізації алгоритму розрахунку оптимального температурного графіку прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини;*

5. Жученко А. И. / Расчёт прогрева бумажного полотна. / Жученко А. И., Черёпкин Е. С. //Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – К.: НТУУ «КПІ». – 2014. –№2 (13). – С. 104 –110. *Здобувачем розроблено алгоритм розрахунку оптимального температурного графіку прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини;*

6. Черёпкин Е. С. Математическая модель прогрева бумажного полотна в сушильной части бумагоделательной машины / Жученко А. И., Черёпкин Е. С. // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – К.: НТУУ «КПІ», 2014 1 (12). – С. 106 – 114. *Здобувачем розроблено систему рівнянь для розрахунку температури паперового полотна на виході з сушильних циліндрів та ділянок вільного руху;*

7. Патент України на корисну модель UA 107812 МПК (2016.01) D21F 5/00 G01K 13/00. Прилад для вимірювання температури стінки сушильного циліндра / А. І. Жученко, Є. С. Черёпкін. Опубл. 24.06.2016. – Бюл. № 12. – 3с *Здобувачем проведено аналіз роботи відомих приладів для вимірювання температури паперового полотна у сушильній частині папероробної машини, пошук недоліків відомих засобів вимірювання, розробка приладу ;*

8. Черёпкін Є. С. Параметричний аналіз сушильної частини папероробної машини як об'єкта автоматичного керування [текст] / Жученко А. І., Черёпкін Є. С. // Тези доповідей XXI міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика 2014». К.: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 274 – 276 *Здобувачем проведено аналіз літературних джерел за темою дисертації;*

9. Черёпкин Е. С. Постановка задачи для следящей системы регулирования процессом прогрева бумажного полотна [текст] / Жученко А. И., Черёпкин Е. С. // Матеріали XII Міжнародної конференції "Контроль і управління в складних системах" (КУСС-2014). 14 по 16 жовтня 2014 року у м. Вінниця. – С. 150 *Здобувачем сформована задача для оптимальної роботи системи керування;*

10. Черёпкин Е. С. Постановка задачи оптимального управления процессом прогрева бумажного полотна [текст] / Жученко А. И., Черёпкин Е. С. // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27 [текст]: сб. трудов XXVII Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т.5. Секция 3 / под общ. ред. А.А. Большакова. – Тамбов : Тамбовск. гос. техн. ун-т, 2014. – С. 84 – 85 *Здобувачем побудована, на основі експериментальних даних, функціональних залежностей між параметрами якості паперового полотна і керувальними впливами;*

11. Черьопкін Є. С. Сушильна частина БДМ як об'єкт автоматичного керування [текст] / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами», 27 листопада 2014 р. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2014 р. С – 41 – 43 *Здобувачем проведено параметричний аналіз сушильної частини;*

12. Черьопкін Є. С. Обмеження на параметри якості при побудові температурного графіка прогрівання паперового полотна [текст] / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Тези доповідей науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» -2014; Київ, НТУУ «КПІ», 10 листопада 2014. – К: НТУУ «КПІ» 2014. – 85с *Здобувачем сформульовані обмеження на параметри якості;*

13. Черьопкін Є. С. Слідкувальна система керування процесом прогрівання паперового полотна [текст] / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Тези доповідей науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» -2014; Київ, НТУУ «КПІ», 10 листопада 2014. – К: НТУУ «КПІ» 2014. С – 96 *Здобувачем розроблено структуру системи керування;*

14. Черьопкін Є. С. Селекторний блок керування за рівнем збурення у системі [текст] / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Техника и технология. Современные тенденции в науке и образовании/inzynieria i technologia. wspolczesne tendencje w nauce i edukacji Gdansk, 30.03.2016- 31.03.2016. С – 10 – 13 *Здобувачем розроблено алгоритм роботи селекторного блоку за рівнем збурення;*

15. Черьопкін Є. С. Адаптація параметрів ПІД-регулятора відповідно до зміни роботи системи [текст] / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології 2016. – Місце проведення – НТУУ "КПІ", Київ; Дата проведення: 21.04.2016. С – 62 – 63 *Здобувачем розроблено алгоритм адаптації параметрів регулятора;*

16. Черьопкін Є. С. Керування процесом прогрівання паперового полотна при відсутності збурень [текст] / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Сучасні методи,

інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами. – Місце проведення – НУХТ, Київ; Дата проведення: 25.11.2015. С – 41 – 43 *Здобувачем проведено експериментальні дослідження роботи системи керування;*

17. Черьопкін Є. С. Використання блока автоналаштування параметрів ПД-регулятора в LabView [текст] / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (дев'ята науково-практична конференція студентів. – Дата проведення: 09.12.2015. С – 54 – 56 *Здобувачем проведено дослідження роботи блоку автоналаштування параметрів регулятора.*

## SUMMARY

*Cheropkin E. S. Automation processes control of the paper web heating in the dryer section of the paper machine. - Qualifying scientific work as the manuscripts.*

Thesis for a candidate degree in specialty 05.13.07 " Automation of process control" - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Ministry of Education and Science of Ukraine , Kyiv, 2017.

The dissertation is devoted to the issues of increasing the efficiency of the paper drying process on a paper machine by creating a system for automating of controlling processes of its heating as a determining stage of drying in terms of quality of finished products, resource and energy conservation.

The paper deals with the process of paper production on paper-making machines of different construction. During the research were analyzed all technological processes as an objects of automatic control.

Was carried out parametrical analysis of all technological stages of production on a paper machine, on the basis of which was created information about main input and output parameters, were determined perturbing and control influences.

On the basis of the analysis, the key role of the drying process has been established as the main stage in terms of quality parameters of finished products and the potential for increasing the efficiency of resource and energy conservation. Based on data from literary

sources was analysed existing solutions in the field of mathematical modeling and control systems of the drying section and highlighted their drawbacks.

Was determined the inadequate consideration of the control of the process of heating the paper web, as the first and in many ways determining stage of the drying process. The main features and tasks of this stage were analyzed.

In case of developing a mathematical model of the process of heating paper web in the drying section of the paper-making machine were analyzed the physical and chemical processes occurring during the passage of the paper web through the drying cylinders and free-course sections at low temperatures, which corresponds to the features of this drying stage.

The mathematical model of the process of heating the paper web on the basis of equations of heat and mass transfer and non-stationary thermal conductivity is proposed considering the geometric features of the drying part and the properties of the paper web. Separately allocated two mathematical models for contact and convective drying.

For the purpose of checking the developed mathematical model for the adequacy to the actual technological process, we obtained data of the temperature of the paper at the output of the first 8 drying cylinders and sections of free motion from an active paper-making machine, and the corresponding calculations were made on the developed mathematical model. Offset paper was used as a research object. The test for the adequacy of the mathematical model was carried out using statistical criteria of Student and Fisher.

Comparing the calculated value of the Student and Fisher test for all points of the arrays of experimental temperatures and obtained on a mathematical model with tabular data, was concluded that there is no reason to reject the hypothesis that the mathematical model of the heating of a paper web is adequacy to its real. Therefore, it is considered that the mathematical model adequately describes the technological process of heating the paper web in the drying section of the paper-making machine.

For the sake of convenience, the further use of the developed mathematical model for synthesizing the control system of the process of heating the paper web in the drying portion of the paper-making machine was presented in the form of a system of difference equations, which include the calculation of the temperature of the boundary layer of the

paper web on the exit from the drying cylinder, at the end of the free section movement and temperature calculation of the central layer of a paper web.

During the work was selected the criterion of the quality of optimal control which is as follows find such control influences (steam consumption in drying cylinders), during which there will be minimization of the deviation of the actual temperature of the paper web at the output of each drying cylinder from a given value.

Was conducted the study of the relationship between management influences and product quality parameters. Have been formed limitations on quality parameters of finished products and control actions.

In order to calculate the value of the proposed optimal control criterion, it is first necessary to have information about the values of the temperature at the exit from each drying cylinder and the free motion sections. Moreover, in an extremely fast process flow and a change in the large number of technological parameters, arises the problem of obtaining a dynamically changing optimal temperature graph of the heating of a paper web, which takes into account the peculiarities of the technological process.

At the same time, realization of the set task should take into account the necessity of speeding up the temperature of the paper to the set value (completion of the heating process). However, since the paper refers to capillary-porous colloidal materials the sharp increase in temperature will cause processes of destruction of the internal structure, leading to a significant deterioration of qualitative indicators. This also leads to the contamination of the surface of the drying cylinders and dramatically reduces the efficiency of drying.

In order to obtain the task for the temperature of the paper web on the output of each drying cylinder, it is necessary to have an optimal temperature graph of heating of the paper web.

On the basis of the analysis of literary data and experimental research, an algorithm for calculating the optimal temperature graph paper heating is developed. The received algorithm was based on the developed special application software for adjusting the task of control in real time in accordance with the received testimony from the sensors installed on the control object.

On the basis of the classical monitoring system of automatic control, a system for controlling the process of heating the paper web in the drying section of the paper-making machine was developed. Was carried out research of different configurations of the control unit on the basis of the regulator using the method of dynamic programming, PID-regulator with auto-tuning algorithm, PID-regulators with changing boundaries of the object of control and their possible combinations.

The effectiveness of the developed solutions was checked on the control object with integration of generator of disturbing influences. In order to implement a selective control system based on the magnitude of disturbing influence, the system has been set up to determine the disturbance estimation unit and to study the quality of its work.

In the framework of the study, a comparative analysis of the internal structure of the control unit of various configurations was conducted: a regulator based on the method of dynamic programming (in the presence and absence of disturbances); one PID regulator with an algorithm for auto-setting parameters (in the presence of perturbations); three PID regulators with changing boundaries of the control object with auto-setting; combined structure: dynamic programming method + PID-regulators with changing boundaries of the control object with auto-setting.

Having analyzed the received data of the control system, were made practical conclusions. On the one hand, the use of the configuration of the control unit in the form of three PID regulators with changing structure of the control object is most effective in controlling a process with a high degree of disturbing influences. On the other hand, the regulator based on the dynamic programming method showed high performance for small disturbances and has higher performance compared to the PID regulators.

The conducted studies have shown that the most effective combination is a selective control configuration. Depending on the level of disturbing influences in the control system, it will move to the regulator unit using the dynamic programming method or to a block of three PID regulators with changing boundaries of the control object.

Since the technological process of heating the paper web occurs at a speed of paper width up to 600 m / min, even for a short period of operation of the system for not optimal control, it is possible to obtain a large amount of paper of unsatisfactory quality. In order

to prevent such cases in the work of the developed control system, based on the calculated array of control influences it is proposed to perform their verification with the help of the developed mathematical model. For operational efficiency of the system, mathematical modeling with acceleration coefficient was implemented, which, with the use of the modern level of computer technology, can cause only a slight delay in the operational efficiency of the control. At the same time, such approach provides an opportunity without intervention in the process itself, to check the quality of the proposed control, and in the event of an unsatisfactory result, to return the information to the block of the PID regulators to reconfigure its parameters and obtain new, improved values of control influences.

The proposed technical solution makes it possible to accelerate the operation of the optimal control system by preventing the recalculation of the parameters of the adjustment of the PID regulators at each iteration of the calculation, but only for unsatisfactory data obtained from the results of mathematical modeling.

**Keywords:** Paper machine, the drying section, mathematical modeling, heating of the paper web, criteria of quality control, control system.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	19
ВСТУП .....	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ПАПЕРОВОГО ПОЛОТНА ЯК ОБ’ЄКТІВ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ....	26
1.1 Загальна характеристика виробництва паперу .....	26
1.2 Види папероробних машин і технологічні процеси виробництва.....	29
1.2.1 Технологічні процеси виробництва паперу на папероробній машині.....	30
1.3 Параметричний аналіз складових частин папероробної машини як об’єктів автоматичного керування .....	35
1.3.1 Підготовка суміші .....	35
1.3.2 Розбавлення паперової маси .....	37
1.3.3 Очищення маси .....	38
1.3.4 Напуск маси на сітку .....	38
1.3.5 Формування і початок зневоднення паперового полотна.....	40
1.3.6 Зневоднення на пресах .....	41
1.3.7 Сушильна частина.....	42
1.3.8 Каландрування .....	44
1.3.9 Сушильна частина як визначальна стадія виробництва паперу.....	45
1.4 Сучасний стан питання розробки автоматизованих систем керування технологічним процесом сушіння паперового полотна .....	46
1.5 Постановка завдання дослідження .....	51
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	52
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОГРІВАННЯ ПАПЕРОВОГО ПОЛОТНА В СУШИЛЬНІЙ ЧАСТИНІ ПАПЕРОРОбНОЇ МАШИНИ .....	54
2.1 Обґрунтування необхідності та постановка завдання математичного моделювання процесу прогрівання паперового полотна .....	54
2.2 Розроблення математичної моделі процесу сушіння паперового полотна.....	57

2.2.1 Особливості тепло- та масопереносу в технологічному процесі сушіння паперового полотна.....	57
2.2.2 Математична модель теплопереносу між сушильним циліндром і контактним шаром паперового полотна .....	58
2.2.3 Математична модель теплопереносу за товщиною паперового полотна .....	61
2.2.4 Математична модель масопереносу на поверхні паперового полотна .....	63
2.2.5 Математична модель масопереносу за товщиною паперового полотна.....	64
2.2.6 Математична модель теплопереносу між навколишнім середовищем і контактним шаром паперового полотна на ділянці вільного руху.....	65
2.2.7 Загальна математична модель сушіння на етапі прогрівання паперового полотна .....	69
2.3 Перевірка адекватності математичної моделі .....	71
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	89
<b>РОЗДІЛ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПРОГРІВАННЯ ПАПЕРОВОГО ПОЛОТНА .....</b>	<b>90</b>
3.1 Вибір критерію оптимальності керування процесом прогрівання паперового полотна .....	90
3.2 Обмеження на параметри якості паперового полотна.....	94
3.3 Оптимальний температурний графік прогрівання паперового полотна.....	98
3.3.1 Обмеження на зміну температури паперового полотна .....	99
3.4 Алгоритм розрахунку оптимального температурного графіка прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини .....	101
3.5 Програмна реалізація алгоритму розрахунку оптимального температурного графіка прогрівання.....	106
3.5.1 Блок вхідних параметрів паперу.....	108
3.5.2 Блок параметрів сушильної частини ПРМ .....	108
3.5.3 Блок параметрів оточуючого повітря.....	109
3.5.4 Блок параметрів тепло - та масообміну .....	110
3.5.5 Блок виводу результатів роботи програми.....	110
3.5.6 Особливості роботи програми .....	111

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	112
РОЗДІЛ 4 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПРОГРІВАННЯ ПАПЕРОВОГО ПОЛОТНА В СУШИЛЬНІЙ ЧАСТИНІ ПАПЕРОРІБНОЇ МАШИНИ.....	113
4.1 Базова структура системи керування процесом прогрівання паперового полотна.....	113
4.2 Внутрішня структура блоку регулювання у системі оптимального керування процесом прогрівання паперового полотна.....	119
4.3 Порівняльний аналіз блоків регулювання у структурі системи оптимального керування.....	119
4.3.1 Метод динамічного програмування у задачі оптимального керування прогріванням паперового полотна.....	119
4.3.2 Метод динамічного програмування за мінімального рівня збурення у системі.....	121
Рисунок 4.5 – Динаміка зміни сумарної похибки в часі за мінімального рівня збурення у системі.....	122
Проаналізувавши отримані результати, можна зробити висновок, що за мінімального рівня збурення у системі метод динамічного програмування розв’язує поставлену задачу керування, оскільки сумарне значення критерію оптимального керування досягає свого екстремуму $\approx$ нуль.....	122
4.3.3 Метод динамічного програмування за наявності збурень у системі.....	122
4.3.4 Використання одного ПІД-регулятора для системи оптимального керування.....	124
4.3.5 Використання трьох ПІД-регуляторів зі змінною структурою об’єкту керування та алгоритмом автоналаштування.....	128
4.3.6 Комбіноване керування: метод динамічного програмування + ПІД-регулятор.....	131
4.4 Вибір технічних засобів автоматизації для реалізації створеної системи автоматичного керування.....	133
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4.....	136

ВИСНОВКИ .....	137
ДОДАТОК А .....	147
ДОДАТОК Б .....	157
ДОДАТОК В .....	161
ДОДАТОК Г .....	162

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПРМ – папероробна машина;

АСК – автоматизована система керування;

ПІ-регулятор – пропорційно-інтегральний регулятор;

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ДМІ – дисперсійна міра ідентичності;

ІМІ – інформаційна міра ідентичності;

СМПЗ – спеціального математичного та програмного забезпечення;

СЦ – сушильний циліндр.

## ВСТУП

У сучасному електронному світі целюлозно-паперова промисловість не втрачає своєї ваги. Згідно світових статистичних даних, об'єми виробництва паперової продукції мають тенденцію до збільшення. Щодо України, то необхідно зауважити, у зв'язку із ситуацією у країні у 2015 році було зафіксовано невеликий спад виробництва. Однак, можливість швидкої адаптації вітчизняного паперового виробництва до складних умов вже у 2016 році показала позитивну динаміку зміни.

Станом на початок 2016 року в Україні функціонувало більше 30 підприємств целюлозно-паперової промисловості з діючими папероробними машинами (ПРМ). Серед них Київський картонно-паперовий комбінат, Малинська паперова фабрика – Вайдманн, Папір-Мал, Рубіжанський картонно-тарний комбінат, Понінківська картонно-паперова фабрика, Луцька картонно-паперова фабрика, Картонно-паперова компанія, ТВГ “Український Папір”, Кохавинська паперова фабрика та інші.

### **Актуальність теми.**

Папероробна машина є ключовим технологічним елементом процесу виробництва паперової продукції. Вона являє собою багатостадійний процес перетворення целюлозної або макулатурної маси у готові паперові вироби. Серед усіх ділянок ПРМ особливо варто виділити сушильну частину, яка є основним споживачем матеріальних та енергетичних ресурсів у всій технологічній схемі виробництва. На її роботу витрачається 30 – 40% всіх матеріальних та енергоресурсів. У зв'язку з цим, відповідно до сучасних світових тенденцій енерго- та ресурсозбереження, постає науково-технічне завдання вдосконалення даного технологічно процесу.

Вирішенню цього питання присвячена велика кількість робіт вітчизняних та закордонних науковців і дослідників. Серед них варто виділити роботи Ликова А.В.[28], Бельского О. П.[26], Лакомкіна В. Ю.[34], Жучкова П.А.[46], Буйлова Г.П.[18], Анашкина А.С.[27], Akesson J.[20], Ekvall J.[53], Bassily A. M.[21], Radha R.[22], Slätteke O.[23].

На основі аналізу попередніх досліджень та сучасного рівня розвитку науки і техніки одним з найбільш ефективних шляхів розв'язання задачі підвищення ефективності процесу прогрівання паперового полотна в сушильній частині ПРМ є створення системи оптимального керування нею, що забезпечить функціонування даного технологічного процесу у режимі ресурсо- та енергозбереження.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Основою дисертаційної роботи є теоретичні і експериментальні дослідження, виконані за безпосередньої участі автора у відповідності до тематики науково-дослідних робіт кафедри автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", а саме ініціативної НДР:

- «Створення комп'ютерно-інтегрованих систем автоматичного контролю та керування, що забезпечують ресурсо- та енергозберігаючі режими функціонування технологічних процесів та виробництв» (№ держ. реєстрації 0110U006890).

### **Мета і завдання дослідження.**

*Метою дослідження є підвищення ефективності процесу сушіння паперового полотна у виробництві паперу шляхом створення системи керування його прогріванням у відповідності до сучасних вимог ресурсо- та енергозбереження.*

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання таких наступних задач:

- вдосконалити математичну модель тепло- та масопереносу у паперовому полотні шляхом врахування особливостей даного процесу на різних етапах сушіння;

- розробити алгоритм та створити програмне забезпечення для розрахунку оптимального температурного графіку прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини;

- сформулювати та обґрунтувати критерій оптимального керування даним технологічним процесом;

- синтезувати систему керування процесом прогрівання паперового полотна та дослідити ефективність її роботи.

**Об'єктом дослідження** є технологічний процес прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини.

**Предметом дослідження** є математичні моделі та системи оптимального керування технологічним процесом прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини.

**Методи дослідження:**

- метод аналізу інформації щодо автоматичних систем керування технологічними процесами на папероробній машині, для обґрунтування актуальності, мети і завдань дослідження;

- метод системного аналізу для формулювання мети дослідження, визначення основних задач, створення структури системи керування, вибору критерію оптимальності та пошуку оптимального варіанту структури системи керування;

- методи математичного моделювання для розробки математичної моделі процесу прогрівання паперового полотна;

- методи математичної статистики для перевірки статистичних гіпотез з метою оцінювання адекватності розробленої математичної моделі;

- методи динамічного програмування для пошуку оптимального розв'язку задачі керування технологічним процесом прогрівання паперового полотна;

- методи аналізу і синтезу систем автоматичного керування для розробки структури та алгоритмів керування;

- методи імітаційного моделювання для визначення ефективності запропонованих системи, методик і алгоритмів.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- вдосконалено математичну модель сушіння паперового полотна шляхом врахування особливостей процесів тепло- та масопереносу на різних його етапах;

- доведено необхідність розробки системи керування процесом прогрівання паперового полотна;

- вперше розроблено алгоритм розрахунку оптимального температурного графіку прогрівання паперового полотна;

- вперше сформовано критерій якості керування процесом прогрівання паперового полотна з урахуванням технологічних особливостей даного етапу сушіння;

- запропоновано новий алгоритм керування процесом прогрівання паперового полотна з урахуванням змінної конфігурацію обладнання і зміни виду продукції;

- вперше розроблено і досліджено селективну систему автоматичного керування процесом прогрівання паперового полотна на основі ПІД-регуляторів з застосуванням методу динамічного програмування.

### **Практичне значення отриманих результатів:**

- розроблена система автоматичного керування забезпечує функціонування процесу прогрівання паперового полотна у режимі ресурсо- та енергозбереження із збереженням високих показників якості готової продукції;

- розроблено програмне рішення для розрахунку оптимального температурного графіку прогрівання паперового полотна, впровадження якого у діючий технологічний процес сушіння різної конфігурації можливий за рахунок інтегрованих алгоритмів самоналаштування;

- розроблена математична модель процесу прогрівання паперового полотна, що може бути використана не тільки для даного етапу, а і наступних етапів сушіння за умови її доповнення рівняннями масопреносу, наведеними у роботі;

- запропоновано конструкцію приладу для вимірювання температури стінки сушильного циліндра (патент України на корисну модель UA 107812 МПК (2016.01) D21F 5/00 G01K 13/00. Опубл. 24.06.2016. –Бюл. № 12);

- результати дисертаційного дослідження впроваджено у виробництво на ПрАТ “Київський картонно-паперовий комбінат” місто Обухів, Київська область;

- матеріали дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі кафедри «Автоматизації хімічних виробництв» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».

### **Особистий внесок здобувача.**

Усі основні положення та результати дисертаційної роботи, що захищаються, одержані автором самостійно. У роботах, що опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: у [73] – побудова, на основі експериментальних даних, функціональних залежностей між параметрами якості паперового полотна і керувальними впливами; у [75] – розроблено алгоритм розрахунку оптимального температурного графіку прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини; у [78] – сформована критерій оптимального керування процесом прогрівання і обмеження на параметри стану та керувальні дії; у [83] – аналіз роботи відомих приладів для вимірювання температури паперового полотна у сушильній частині папероробної машини, пошук недоліків відомих засобів вимірювання, розробка приладу; у [84] – розроблено програмне рішення для реалізації алгоритму розрахунку оптимального температурного графіку прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини; [85] – створено структуру системи керування на основі блоку аналізу рівня збурювальних впливів у системі, розроблено метод керування нелінійними процесами з використання “плаваючих” блоків керування.

### **Апробація результатів дисертації.**

Основні положення та результати дисертаційного дослідження доповідались і обговорювались на:

21 міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика 2014» (2014р. м . Київ ); 1 міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «АКІТ – 2014» (2014 р. м, Київ); 7 міжнародній конференції "Контроль і управління в складних системах" (КУСС-2014) (2014р. м. Вінниця); 27 міжнародній конференції «Математичні методи в техніці та технологіях» ( 2014р. м. Тамбов Росія); міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (2014р. м. Київ); 2 міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «АКІТ – 2015» (2015 р. м, Київ); міжнародній науково-технічній

конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (2015р. м. Київ); 3 міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «АКІТ – 2016» (2016 р. м, Київ); міжнародній конференції «Техника и технология. Актуальные научные проблемы. Рассмотрение, решение, практика./Inżynieria i technologia. Aktualne naukowe problemy. Rozpatrzenie, decyzja, praktyka» ( 2016р. м. Гданьск, Польша).

### **Публікації.**

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у **17** друкованих працях, серед них **6** – статті у провідних фахових наукових виданнях, у тому числі **3** публікації у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз; **1** – патенти на корисні моделі; **10** – матеріали доповідей на міжнародних наукових конференціях.

**Структура роботи** відповідає сформульованій меті й завданням і складається з *Анотації, Вступу*, чотирьох розділів (*Розділ 1. “Аналіз технологічних процесів виробництва паперового полотна як об’єктів автоматичного керування”, Розділ 2. “Математичне моделювання процесу прогрівання паперового полотна в сушильній частині папероробної машини”, Розділ 3. “Оптимізація технологічного процесу прогрівання паперового полотна”, Розділ 4. “Система керування процесом прогрівання паперового полотна в сушильній частині папероробної машини”*) *Висновків, Списку використаних джерел* (84 позиції), *Додатків*. Загальний обсяг дисертації – 161 сторінок, з яких 143 – основний текст.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ПАПЕРОВОГО ПОЛОТНА ЯК ОБ'ЄКТІВ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

#### 1.1 Загальна характеристика виробництва паперу

Папір — матеріал із масою квадратного метра до 250 г, що складається переважно з рослинних волокон, зв'язаних між собою силами поверхневого зчеплення, у якому можуть використовуватися речовини для проклеювання, мінеральні наповнювачі, хімічні та природні волокна, пігменти та барвники. Властивості готового паперу значною мірою залежать від характеристики вихідних напівфабрикатів, що визначає технологічний режим їх переробки. Папір має широке застосування та виготовляється для друку, пакування, санітарно-гігієнічний, водостійкий та жиронепроникний, електроізоляційний та з різними технічними цілями, наприклад, фільтрування, сорбції, тощо [1].

В залежності від виду паперу складають відповідну композицію до якої входять розмелені до необхідного ступеня млива напівфабрикати з додаванням наповнювачів, речовин для проклеювання та забарвлення [2]. Волокнисті напівфабрикати піддають розмелюванню в присутності води у спеціальних апаратах для розмелювання періодичної або безперервної дії. Підготовлену паперову масу регулюють за концентрацією волокна та акумулюють у басейнах з перемішувальним пристроєм. З метою очищення паперової маси від сторонніх включень її пропускають через спеціальне обладнання, попередньо сильно розбавивши масу водою. На сітковий стіл папероробної машини маса поступає безперервним потоком через регульовальні пристрої. На сітці машини відбувається зневоднення розбавленої маси з формуванням паперового полотна, яке потім піддається пресуванню, сушінню, охолодженню, зволоженню, каландруванню та обробці.

Готовий папір на поздовжньо різальному станку розрізають на рулони або листи. Далі папір пакують і відправляють на склад.

В залежності від призначення папір характеризується різною масою  $1 \text{ м}^2$ , товщиною, об'ємною масою, механічною міцністю, ступенем проклеювання, зольністю, білістю, кольором, гладкістю, всмоктувальною здатністю, повітро-, паро-, жиропроникністю, діелектричними та іншими властивостями.

Різні споживчі властивості паперу досягаються вибором волокнистих матеріалів, композицією та технологічним режимом на кожній стадії виготовлення.

Світова паперова промисловість випускає більше 600 видів паперу і картону та для їх виробництва використовується в основному деревна сульфатна та сульфітна целюлоза, целюлоза, отримана із недеревної сировини, напівцелюлоза, деревна маса, макулатура, ганчір'я, синтетичні волокна [3].

Сульфатну целюлозу отримують із подрібненої деревної чи недеревної рослинної сировини розчином, основними компонентами якого є їдкий натрій (NaOH) і сульфід натрію ( $\text{Na}_2\text{S}$ ), за температури  $160\text{-}180 \text{ }^\circ\text{C}$  і тиску  $0,7\text{-}1,2 \text{ МПа}$ . Отриманий напівфабрикат характеризується темним забарвленням, але високими показниками міцності, що дозволяє використовувати його для виробництва різних технічних видів паперу та картону [4].

Сульфітну целюлозу отримують із знесмоленої хвойної, або листяної деревини, чи недеревної сировини розчинами, основними компонентами якого є водний розчин  $\text{SO}_2$  і бісульфіти кальцію, магнію, натрію або амонію, за температури  $130\text{-}145 \text{ }^\circ\text{C}$  і тиску  $0,6\text{-}1,2 \text{ МПа}$ . Сульфітна целюлоза після варіння має вищий вихід в порівнянні із сульфатною, досягає високих значень білості у невибіленому вигляді, а з відпрацьованих щолоків отримують етиловий спирт, кормові дріжджі, ванілін та інші цінні продукти [5].

Напівцелюлоза відноситься до волокнистих напівфабрикатів, які отримують в процесі не тривалого хімічного та термогідролітичного оброблення рослинної сировини з подальшим розділенням волокон механічним розмелюванням. Нині застосування має напівцелюлоза із листяних порід деревини та однорічних рослин, отримана різними способами делігніфікації [6].

Деревна маса виробляється різними способами та у відповідності із цим має різний вихід і властивості.

Деревну масу в залежності від способів отримання, а також технологічних режимів поділяють на два основних види. До першого виду відносять масу, яка виготовляється без використання хімічних реагентів з виходом 95 – 98%. Це дефібрерна деревна маса (ДДМ), термодефібрерна деревна маса (ТДДМ), деревна маса тиску (ДМТ), рафінерна деревна маса (РДМ), термомеханічна маса (ТММ).

До другого виду механічних мас відноситься хіміко-механічна маса (ХММ), яка поділяється на три підвиди. Найбільш поширена хіміко-термомеханічна маса (ХТММ), хімічно модифікована маса, термомеханічна маса, де використання хімічних реагентів передбачено після стадії розмелювання (ТМХМ).

Макулатура – це папір, картон, а також вироби з них, які у вигляді відходів виробництва або після використання можуть бути знову перероблені та використані для виготовлення паперу, картону і іншої продукції. Паперову макулатуру відносять до вторинної сировини тому, що її волокна набули незворотніх змін, в основному під час сушіння, що призводить до втрати еластичності, ороговіння їх поверхні. Використання макулатури у процесі виробництва паперу знижує затрати приблизно у 2..3 рази в порівнянні із целюлозою та зменшує забруднення довкілля. Одна тонна макулатури економить 3,0 – 4,5 м<sup>3</sup> деревини або близько 15 дерев.

Ганчір'я також належить до вторинної сировини. Його використовують в основному для виготовлення паперу з високими показниками міцності та довговічності.

Синтетичні волокна органічного походження та мінеральні волокна використовують для виробництва спеціальних видів технічного паперу із заздалегідь визначеними властивостями. До синтетичних волокон відносять гідрофобні поліефірні, поліамідні, поліетиленові та інші, які не розмелюють у воді. Папір виготовляють із використанням азбестових, базальтових, скляних волокон, що характеризуються підвищеною термостійкістю, довговічністю, стійкістю до хімікатів та інше.

У процесі виробництва більшості видів паперу до волокнистих речовин додають значну кількість мінеральних речовин, які називають наповнювачами.

Основною метою введення наповнювачів у папір є надання паперові таких властивостей як білості, непрозорості, м'якості, гладкості, всмоктувальної здатності та інші. Більшість наповнювачів значно дешевші, ніж волокнисті напівфабрикати, тому їх додавання значно знижує вартість виробництва паперу. Проте, поліпшуючи одні властивості паперу, наповнювачі погіршують інші, наприклад, знижують механічну міцність та ступінь проклеювання паперу. Для кожного виду паперу додається оптимальна кількість певного наповнювача. Найчастіше використовують каолін, гіпс, тальк, крейду, азбестин, сульфати барію та кальцію, диоксид титану, алюмосилікати тощо [7].

## 1.2 Види папероробних машин і технологічні процеси виробництва

Основним елементом технологічного процесу виробництва паперового полотна є папероробна машина. На сьогоднішній день всі папероробні машини за конструкцією поділять на п'ять основних груп [8]:

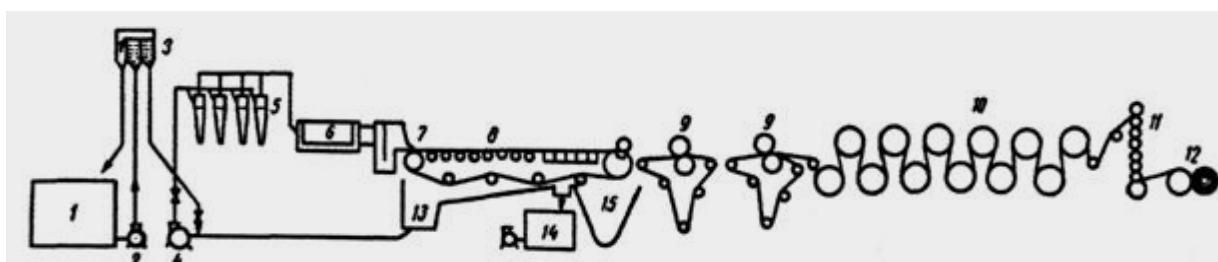
1. плоскіткові або столові;
2. циліндрові;
3. комбіновані із двох перших груп;
4. листові;
5. машини сухого формування.

Кожна із цих груп включає окремі різновиди машин, які відрізняються один від одного лише пристроями для випуску маси на сітку та способом відливу паперового полотна.

Для виробництва масових видів паперу використовують плоскіткові машини та круглосіткові (циліндрові) - для спеціальних видів паперу. Вони відрізняються

між собою лише пристроями для випуску маси на сітку і відливу паперового полотна. Технологія виробництва паперу на цих машинах є однаковою [8].

Виділяють таке основне технологічне обладнання папероробної машини (ПРМ) (рис. 1.1): композиційний (машинний) басейн для підготовки паперової маси, система розбавлення водою до необхідної концентрації, яка складається з насоса, бачка переливу і змішувача, вихрових конічних очисників та вузлоуловлювачів від включень неволокнистого та волокнистого характеру, напірний ящик, сітковий стіл, пресова частина, сушильна частина, відділ обробки і намотки готового паперу (каландр і накат).



1 – композиційний (машинний)басейн; 2 – масний насос; 3 – бачок переливу; 4 – змішувальний насос; 5 – вихрові очисники; 6 – вузлоуловлювач; 7 – напірний ящик; 8 – сітковий стіл; 9 – мокрі преси; 10 – сушильна частина; 11 – каландр; 12 – накат; 13 – збірник оборотних вод; 14 – збірник надлишкових вод; 15 – басейн мокрого браку.

Рисунок 1.1 – Технологічна схема папероробної машини:

### 1.2.1 Технологічні процеси виробництва паперу на папероробній машині

Готова паперова маса за концентрації приблизно 3 – 4% за допомогою насоса з масопідготовчого відділу подається в машинний басейн, де постійним перемішуванням маси досягається вирівнювання ступеня млива та концентрації у всьому об'ємі. Далі через бак постійного рівня маса подається у змішувальний насос для попереднього розбавлення маси оборотною водою до концентрації приблизно 0,1 – 1,3% в залежності від виду паперу та нормальної роботи очисного

обладнання. Використання центроклинерів, центроскринів, вузлоуловлювачів дозволяє видалити із маси різні сторонні включення мінерального та волокнистого походження. Підготовлена паперова маса подається до напірного ящика, звідки під визначеним тиском безперервним потоком вона витікає на сітку папероробної машини.

На папероробній машині відбуваються наступні технологічні процеси:

- відливання паперової маси;
- формування паперу;
- зневоднювання;
- пресування;
- сушіння;
- охолодження;
- оздоблення;
- складання готової продукції.

Сітка є основною складовою частиною папероробної машини. На сітці формується паперове полотно із суспензії та відбувається початкове його зневоднення до його сухості 17 – 22%. Від характеристики сітки залежить якість паперу та ефективність роботи машини, тому вона має бути міцною, достатньо густою та рівномірно пропускати воду. Номер сітки (розмір зерна сітки) залежить від кількості ниток основи, які припадають на 1 см ширини сітки. Із зменшенням товщини паперу, ступінь млива паперової маси підвищується та використовується сітка більш густіша.

Сітки виготовляють на ткацьких верстатах спеціальної конструкції з металевого дроту, де основою є дріт, виготовлений із бронзи. Сітки також можуть бути виготовлені із синтетичних волокон, вони є більш довговічними, у 6 – 8 разів легші, а виготовлений папір якісніший. Проте їх використання потребує більших затрат енергії та ретельнішого підготовлення паперової маси.

Швидкість подавання паперової маси на сітку впливає на якість паперу. Остання залежить від рівномірного розподілу маси та волокон у поздовжньому та поперечному напрямках. Якщо швидкість потоку паперової маси ( $V_{\text{пм}}$ ) менша від

швидкості руху сітки ( $V_{pc}$ ), то волокна орієнтуються переважно в повздовжньому напрямку. Міцність паперу в цьому напрямі буде більшою ніж, у поперечному. На практиці, обидві швидкості мають бути майже однаковими. У разі виробництва товстого паперу та картону швидкість руху сітки повинна бути дещо меншою.

Зневоднення паперової маси на сітці проводять за рахунок фільтрування. Швидкість зневоднення паперової маси впливає на якість готового паперу, наприклад, підвищення швидкості зневоднювання, призводить до погіршення якості паперу.

Для поліпшення структури паперу в процесі зневоднення на машині встановлено вирівнювач – легкий порожнистий валик, обтягнений сіткою, густішою ніж основна сітка.

Якщо на сітку вирівнювача нанести випуклий рисунок, то в разі тиску валика на ще несформоване паперове полотно випуклий рисунок розсуне волокна і відіб'ється на папері. Отримані рисунки називають водяними знаками. Їх добре видно на просвіт.

Зневоднення сирого паперу до сухості 30 – 40% відбувається у пресовій частині за рахунок механічного віджимання вологи з використанням пресів різної конструкції. Під час проходження паперу через преси відбувається подальше зниження вологості паперу, ущільнення, що призводить до зниження пористості та поліпшення його фізико-механічних показників.

Висушують папір у сушильній частині машини. Тут відбувається остаточне зневоднення паперу та доведення до встановленої стандартами вологості для кожного його виду. У процесі висушування крім кінцевого зневоднення, закінчується процес проклеювання паперу за рахунок гідрофобізації речовин, які були додані до паперової маси. Температурний режим сушіння суттєво впливає на властивості паперу.

Сушіння паперу проводять контактним та конвективним способами. У процесі контактної складової теплота від нагрітої поверхні сушильних циліндрів, які обігріваються зсередини нагрітою парою безпосередньо передається вологому полотну. Температура сушильних циліндрів, у середину яких подають гарячу пару,

залежить від виду паперу та не перевищує 180°C. Цей спосіб сушіння достатньо економічний та дозволяє досягати високої якості паперу, а саме відсутність жолоблення та підвищення його гладкості. Наприклад, для висушування конденсаторного паперу вона становить 60 – 70°C [3].

З метою інтенсифікації процесу сушіння паперу та кращого регулювання вологості за шириною полотна використовують конвективне сушіння. Використання ковпаків швидкісного сушіння дозволяє досягати більш високого ступеня сушіння, в порівнянні із контактним сушінням. У разі конвективного способу сушіння папір висушують нагрітим повітрям.

Технологічні процеси зневоднення, пресування та сушіння паперового полотна доповнюють один одного. Зневоднювати папір сушінням дорожче в 10 – 12 разів, ніж пресуванням, і в 60 – 70 разів дорожче, ніж зневоднюванням на сітці [9].

На завершальній стадії виготовлення паперу здійснюють ряд операцій, які поліпшують його споживчі властивості. За допомогою спеціальних пристроїв паперове полотно піддають ущільненню з використанням напівсирого каландра та облагороджують поверхню, наприклад, обробленням в клеїльному пресі, нанесенням крейдових покриттів, мікрокрепуванням, зволоженням та охолодженням, каландруванням та інше.

Проклеювання паперу проводять для поліпшення зімкнутості його структури, підвищення міцності, гладкості, водо-, паро-, жиронепроникності, для усунення різнобічності, шорсткості і інше. Найбільш поширеним способом поверхневого проклеювання є використання клеїльних пресів. У даному процесі використовують різні види крохмалю, казеїн, полівініловий спирт, латекси тощо. До цих речовин додають добавки для надання паперу спеціальних властивостей. Клеїльні преси встановлюють у тій частині машини, де сухість полотна досягає приблизно 85 – 94% і вони складаються з двох валів, які можуть бути розташовані вертикально, горизонтально або під кутом один до одного. Швидкість руху валків досягає 13,3 м/с [2]. На поверхню паперу наносять 1 – 10г/м<sup>2</sup> клею. Після проклеювання папір досушують. В якості речовин, що використовуються для проклеювання використовують різні види крохмалю, полівініловий спирт, казеїн, натрієва сіль

карбоксиметилцелюлози, латекси та інше. До них можуть додаватися оптичні вибілювачі, а також добавки, що надають паперу спеціальних властивостей.

Крепування паперу дозволяє надати йому шорсткості, м'якості та об'ємності, що дуже важливо для санітарно - гігієнічного, пакувального та деяких інших видів. Крепування готового паперу здійснюють на спеціальних крепувальних пристроях, або безпосередньо на папероробній машині.

Крейдуння паперу проводять з метою надання йому більшої білості, гладкості та кращих друкарських властивостей. Проводять крейдуння з використанням спеціальних крейдувальних пристроїв шляхом нанесення на поверхню паперу покриття, яке складається із пігментів та речовин для зв'язування, наприклад, крохмаль, полівініловий спирт тощо [2].

В процесі каландрування паперу відбувається зменшення та вирівнювання товщини полотна за всією шириною, а також підвищення його щільності та гладкості. Машинні каландри складаються із батареї ретельно відполірованих металевих валів, кількість яких залежить від конструкції каландра та виду паперу, який виготовляється. Вали розміщені у вертикальній площині один над одним.

Завершальною операцією технологічного процесу виробництва паперу є його змотування в рулони або розрізування на листи певного розміру. Після цього папір маркують та пакують.

Виробництво паперу вважається практично безвідходним, оскільки нестандартну продукцію у вигляді мокрого та сухого браку, а також відсічки відправляють на повторний цикл виробництва. Воду, яка утворюється в результаті зневоднення паперової маси на сітковому столі, піддають очищенню від дрібного волокна, з використанням фільтрів, та подають у технологічний потік.

### 1.3 Параметричний аналіз складових частин папероробної машини як об'єктів автоматичного керування

Для вирішення задач оптимального керування технологічними процесами, що відбуваються у ПРМ, перш за все необхідно виконати параметричний аналіз технологічних схем елементів папероробної машини із зазначенням вхідних і вихідних змінних, а також керувальних і збурювальних. Аналіз отриманих даних може вказати на “вузькі місця” у технологічному процесі, які потребують вдосконалення, що в подальшому надасть можливість сформулювати задачі синтезу системи керування і перейти до її побудови.

#### 1.3.1 Підготовка суміші

Першим об'єктом технологічного процесу виробництва паперу на ПРМ є акумулювальна ємність. Вона являє собою резервуар з перемішувальним пристроєм для підготовки з вхідних потоків паперової суміші заданого співвідношення. Окремими трубопроводами подаються компоненти (целюлоза, напівцелюлоза, деревна маса, каніфольний клей, крохмаль, каолін, фарба), які надходять до ємності перемішуються мішалкою і формують однорідну масу з якої у подальшому буде формуватися паперове полотно [2].

Параметрична схема акумулювальної ємності зображена на рис. 1.2:

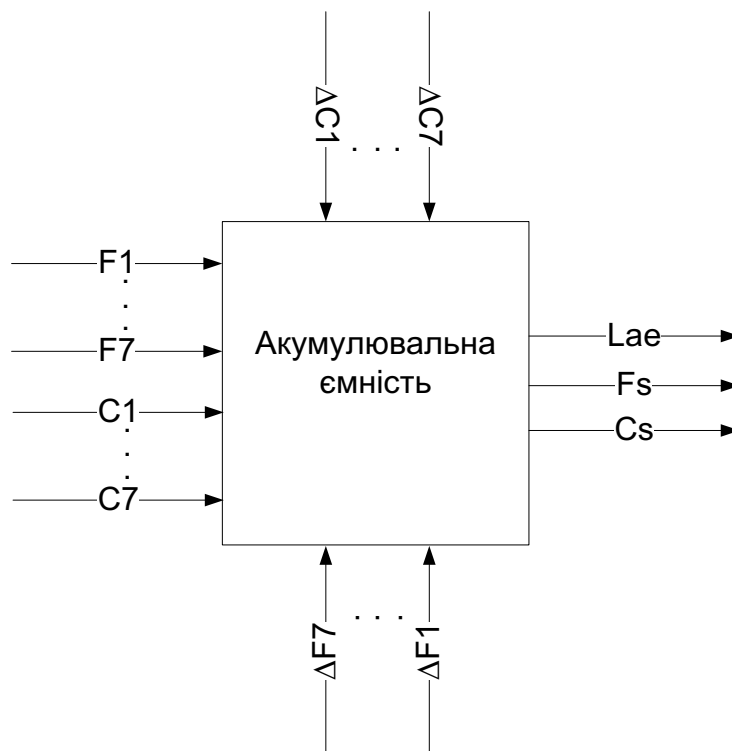


Рисунок 1.2 – Параметрична схема акумулювальної ємності

На вхід апарату надходять потоки целюлози  $F1$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , напівцелюлози  $F2$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , деревної маси  $F3$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , каніфольного клею  $F4$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , крохмалю  $F5$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , каоліну  $F6$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , фарби  $F7$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$  з концентрацією целюлози  $C1$ , %, напівцелюлози  $C2$ , %, деревної маси  $C3$ , %, каніфольного клею  $C4$ , %, крохмалю  $C5$ , %, каоліну  $C6$ , %, фарби  $C7$ , %.

Вихідними змінними є концентрація волокна у суміші,  $Cs$ , %, витрата суміші на виході,  $Fs$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , рівень суміші у ємності  $Lae$ , м. Збуреннями є коливання концентрацій вхідних потоків целюлози  $\Delta C1$ , %, напівцелюлози  $\Delta C2$ , %, деревної маси  $\Delta C3$ , %, каніфольного клею  $\Delta C4$ , %, крохмалю  $\Delta C5$ , %, каоліну  $\Delta C6$ , %, фарби  $\Delta C7$ , %. Керуваннями – зміна витрати вхідних потоків целюлози  $\Delta F1$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , напівцелюлози  $\Delta F2$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , деревної маси  $\Delta F3$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , каніфольного клею  $\Delta F4$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , крохмалю  $\Delta F5$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , каоліну  $\Delta F6$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , фарби  $\Delta F7$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$

### 1.3.2 Розбавлення паперової маси

З акумулювальної ємності однорідна суміш подається у відділ розбавлення її оборотною водою, на виході з якого отримують концентрацію (за волокном) 0,7 – 1,1%, що необхідна для подальшого використання у відділі очищення [2].

Вода для розбавлення надходить із басейна підсіткових вод ПРМ.

Процес розбавлення відбувається у відцентровому насосі, параметрична схема якого зображена на рис. 1.3. У насос подаються паперова маса і вода в заданих пропорціях.

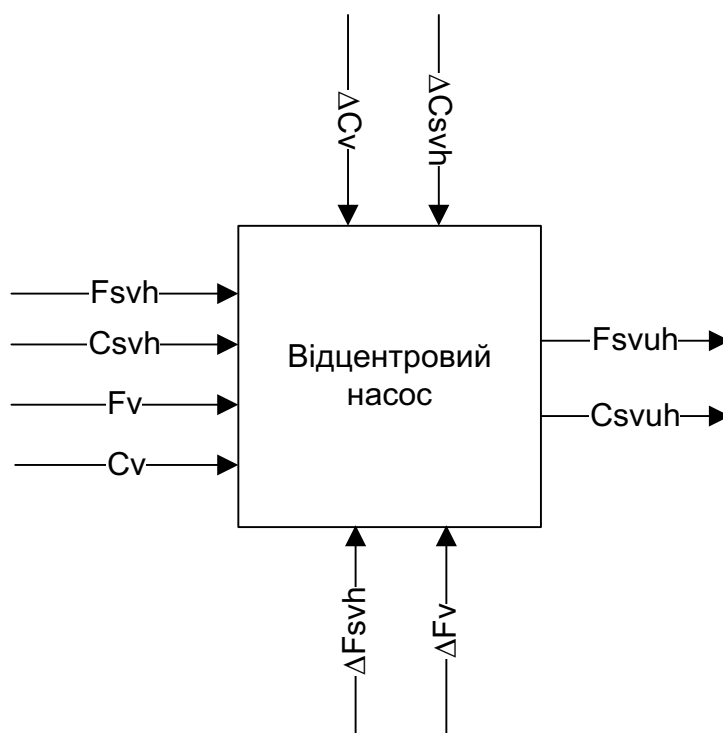


Рисунок 1.3 – Параметрична схема відцентрового насосу

Вхідними змінними є концентрація волокна у суміші  $C_{svh}$ , %, концентрація волокна в оборотній воді  $C_v$ , %, витрата суміші на вході  $F_{svh}$ , м<sup>3</sup>/год. і витрата води для розбавлення  $F_v$ , м<sup>3</sup>/год. Вихідними – концентрація волокна у суміші на виході з насосу,  $C_{svuh}$ , % і витрата суміші на виході з насосу  $F_{svuh}$ , м<sup>3</sup>/год. Збуреннями є коливання концентрації волокна у суміші  $\Delta C_{svh}$ , %, коливання концентрації

волокна у оборотній воді  $\Delta C_v$ , %. Керуваннями – зміни витрат суміші на вході  $\Delta F_{svh}$ , м<sup>3</sup>/год. і води для розбавлення  $\Delta F_v$ , м<sup>3</sup>/год.

### 1.3.3 Очищення маси

Після розбавлення суміш поступає у відділ очищення, який складається з вихрових конічних очисників та вузлоуловлювачів. Призначенням цих апаратів є видалення із суміші домішок різного характеру.

Зазвичай, встановлюють декілька (3-4) ступені вихрових очисників для ефективного видалення мінеральних домішок з паперової суміші [2]. Використання такого обладнання також дозволяє видалити надлишок повітря, який призводить до зниження якості кінцевої продукції.

Другим етапом очищення є пропускання суміші через вузлоуловлювачі. Очищення відбувається шляхом її проходження через вузькі щілини (шліци), що прорізані в плитах, які піддаються легкому струшуванню. Через щілини проходять лише волокна необхідного розміру, у той час, коли пучки і вузли затримуються і виводяться з потоку.

Стадія очищення не розглядається як об'єкт автоматизації, оскільки вихідні параметри цього процесу повністю залежить від конструктивних особливостей апаратів і попереднього підбору необхідних фільтрів.

### 1.3.4 Напуск маси на сітку

Очищена від домішок суміш подається у напірний ящик для подальшого напуску на сітковий стіл. Напірний ящик є одним із найбільш відповідальних об'єктів автоматизації ПРМ.

Паперова маса концентрацією 0,1...0,3 % (в залежності від виду й ваги паперу, що виробляється подається), крізь випускальну щілину витікає по всій ширині машини на швидкокорухому нескінченну металеву сітку зі швидкістю, що наближається до швидкості сітки.

Швидкість витікання паперової маси з напірного ящика можна однозначно встановити за рахунок вихідних змінних і вона має відповідати виду паперу, що виробляється. Коефіцієнт співвідношення швидкостей витікання маси і руху сіткової частини:

$$a = Vm/Vc = 0.85\dots0.93,$$

де  $Vm$ - швидкість випускання маси з напірного ящика, м/хв.;

$Vc$ - швидкість сітки, м/хв.

Швидкість сітки задають на етапі пуску ПРМ і вона не змінюється з часом.

Параметрична схема напірного ящика зображена на рис. 1.4.

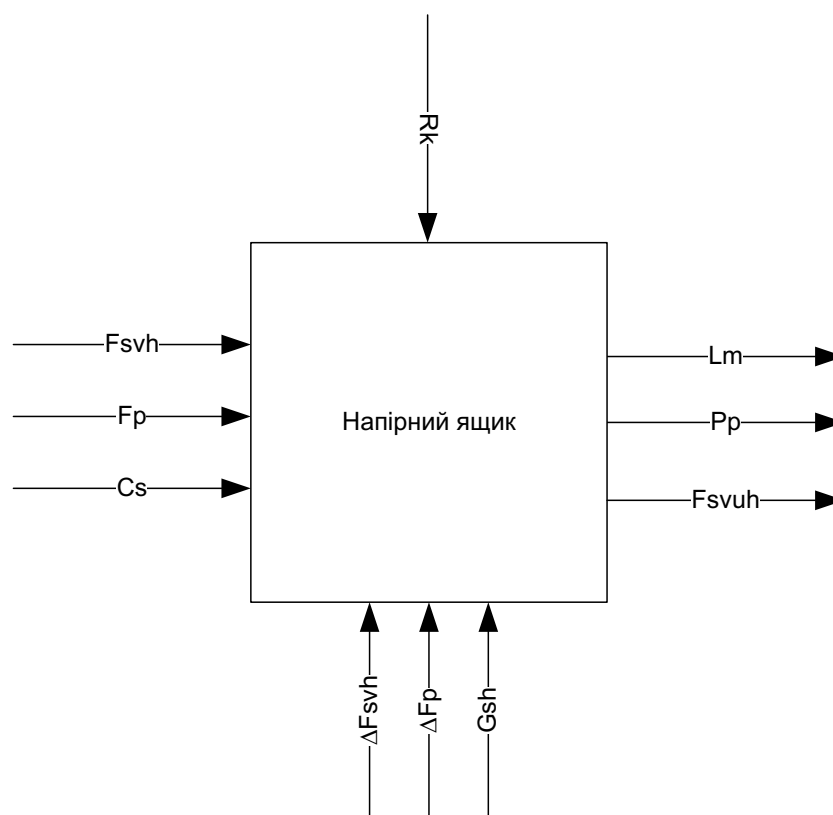


Рисунок 1.4 – Параметрична схема напірного ящика

Вхідними змінними є витрати паперової маси,  $F_{svh}$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , витрата повітря  $F_p$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , волокна у суміші  $C_s$ ,  $\%$ . Вихідними – рівень маси у ящику  $L_m$ ,  $\text{м.}$ , тиск повітряної подушки  $P_p$ ,  $\text{кгс}/\text{м}^2$ , витрата суміші на виході з напірного ящика  $F_{svuh}$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$  Збуренням є зміна режиму роботи компресора  $R_k$ , внаслідок чого може відбуватися стрибкоподібна зміна тиску у ящику, що призводить до порушення нормальної роботи апарату. Керуваннями – зміна витрати паперової маси,  $\Delta F_{svh}$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$  і повітря  $\Delta F_p$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , а також положення заслінки у подавальній щілині,  $G_z$ ,  $\text{мм.}$

### 1.3.5 Формування і початок зневоднення паперового полотна

З напірного ящика маса подається на сітковий стіл. Він складається з грудного вала, 10 – 15 гідропланок, 7 – 10 відсмоктувальних мокрих або сухих ящиків, гауч-вала і самої сітки [2]. На столі відбувається процес формування паперового полотна шляхом видалення значної кількості води за допомогою різних елементів, призначених для зневоднення полотна.

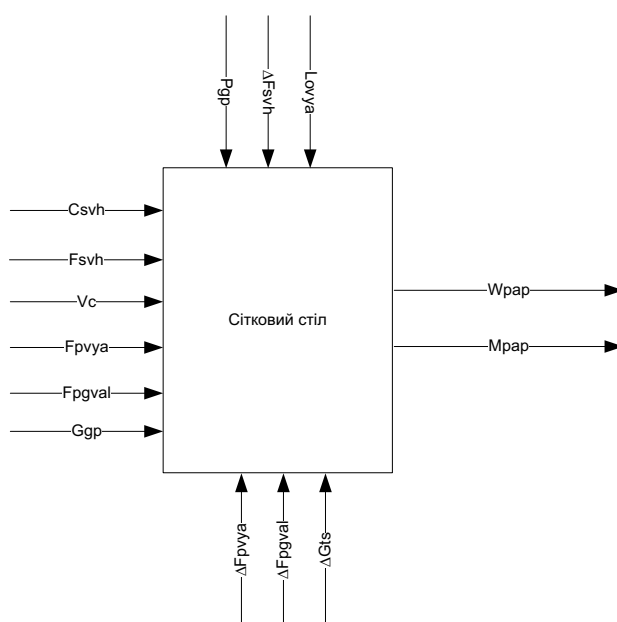


Рисунок 1.5 – Параметрична схема сіткового столу

Відповідно до розробленої параметричної схеми сіткового столу (рис. 1.5) вхідними змінними є швидкість сіткової частини  $V_c$ , м/хв., концентрація волокна у суміші  $C_{svh}$ , %, витрата паперової маси  $F_{svh}$ , м<sup>3</sup>/год., витрата повітря для відсмоктувальних ящиків  $F_{rvya}$ , м<sup>3</sup>/год., витрата повітря для гауч-вала  $F_{rgval}$ , м<sup>3</sup>/год. положення гідропланок  $G_{gr}$ , мм. Вихідними – вологість паперу на виході із сіткової частини  $M_{pap}$ , %; маса 1м<sup>2</sup> паперу  $W_{pap}$ . Збуреннями є вакуум у гідропланках  $P_{gr}$ , кПа, ступінь чистоти відсмоктувальних ящиків  $L_o$ , мм, коливання витрати суміші на вході  $\Delta F_{svh}$ , м<sup>3</sup>/год. Керуваннями – зміна витрати повітря для відсмоктувальних ящиків  $\Delta F_{rvya}$ , м<sup>3</sup>/год., зміна витрати повітря для гауч-вала  $\Delta F_{rgval}$ , м<sup>3</sup>/год., зміна положення гідропланок  $\Delta G_{ts}$ , мм.

### 1.3.6 Зневоднення на пресах

Наступною стадією папероробної машини є зневоднення паперового полотна на пресах, її параметричну схему зображено на рис. 1.6.

В пресову частину полотно надходить зі значенням вологості 75 – 80% (залежно від виду паперу). Ця частина являє собою набір пресів (два вали з маленьким зазором між ними), в яких відбувається механічне видалення вологи за рахунок пропускання матеріалу через щілину між двома валами [2].

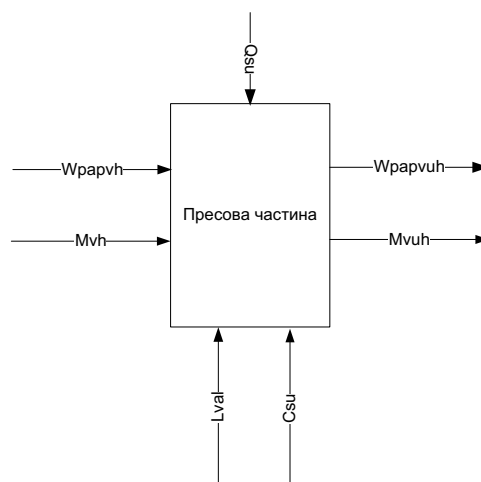


Рисунок 1.6 – Параметрична схема пресової частини

Вхідними змінними є вологість паперу на вході пресової частини  $M_{vh}$ , % і маса  $1\text{ м}^2$  паперу на вході в пресову частину  $W_{pavh}$ , г. Вихідними – вологість на виході  $M_{vuh}$ , % і маса  $1\text{ м}^2$  паперу на виході з пресової частини  $W_{pavuh}$ , г.. Збуренням для даного етапу є зміна структури сукна  $Q_{su}$ , %. Керуваннями – зазор між валами  $L_{val}$ , мм., сухість сукна  $C_{su}$ , %.

### 1.3.7 Сушильна частина

Остаточне видалення вологи з полотна (до значення 5 – 10% вологості), відбувається у сушильній частині ПРМ.

На цю стадію папір надходить за вологості приблизно 55 – 60% [2]. Існує багато способів сушіння, але найбільшого застосування, в наш час, набув комбінований, який складається з контактної і конвективної стадії. Для реалізації цього способу використовують багатоциліндрові сушки, в яких сушильні циліндри встановлюють у шаховому порядку, а паперове полотно, огинаючи їх, нагрівається і з нього видаляється волога.

Сушильні циліндри нагрівають перегрітою парою, яка подається під тиском 0,5 ... 1,0 МПа і температурі 120 ... 165 °С. Через втрати при теплообміні між парою і стінкою циліндра температура його поверхні на 15 ... 20 °С нижче, ніж у пари усередині нього, а паперового полотна – на 15 ... 30 °С нижче, ніж у сушильного циліндра.

Видалення вологи в процесі проходження полотна між циліндрами відбувається за рахунок конвективного теплообміну і тепла акумульованого на циліндрі.

Параметрична схема цієї частини ПРМ зображена на рис. 1.7.

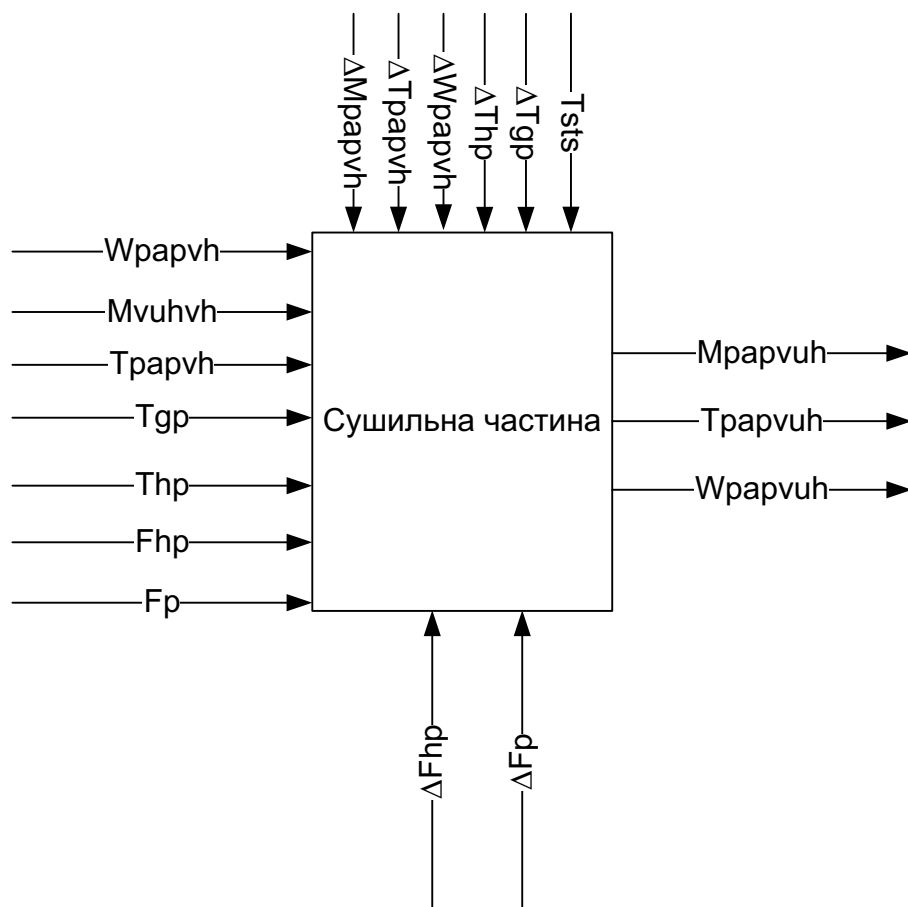


Рисунок 1.7 – Параметрична схема сушильної групи

Вхідними змінними є вологість паперу на вході  $M_{\text{papvh}}$ , %, маса  $1 \text{ м}^2$  паперу на вході  $W_{\text{papvh}}$ , г., температура паперу на вході  $T_{\text{papvh}}$ , °С, температура пари для нагрівання сушильних циліндрів  $T_{\text{gr}}$ , °С, температура холодного повітря  $T_{\text{hp}}$ , °С, витрата пари для нагрівання сушильних циліндрів  $F_{\text{p}}$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , витрата холодного повітря  $F_{\text{hp}}$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ . Вихідними – вологість паперу на виході  $M_{\text{papvuh}}$ , %, маса  $1 \text{ м}^2$  паперу на виході  $W_{\text{papvuh}}$ , г., температура паперу на виході  $T_{\text{papvuh}}$ , °С. Збуреннями для даного етапу є коливання вологості на вході  $\Delta M_{\text{papvh}}$ , %, коливання маси  $1 \text{ м}^2$  паперу на вході  $\Delta W_{\text{papvh}}$ , г., коливання температури паперу на вході  $\Delta T_{\text{papvh}}$ , °С, коливання температури пари для нагрівання сушильних циліндрів  $\Delta T_{\text{gr}}$ , °С, коливання температури холодного повітря  $\Delta T_{\text{hp}}$ , °С, коливання теплопровідності сушильного циліндра  $T_{\text{sts}}$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Керуваннями – зміна витрати пари для нагрівання сушильних циліндрів  $\Delta F_{\text{p}}$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , зміна витрати холодного повітря у міжциліндровий простір  $\Delta F_{\text{hp}}$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$

### 1.3.8 Каландрування

Кінцевим етапом роботи папероробної машини є відділ обробки і намотки. Для обробки зазвичай використовуються каландри і суперкаландри.

Їх основна задача – надання готовій продукції необхідної товщини і гладкості за рахунок пропускання її через зазор у валках, що обертаються [2].

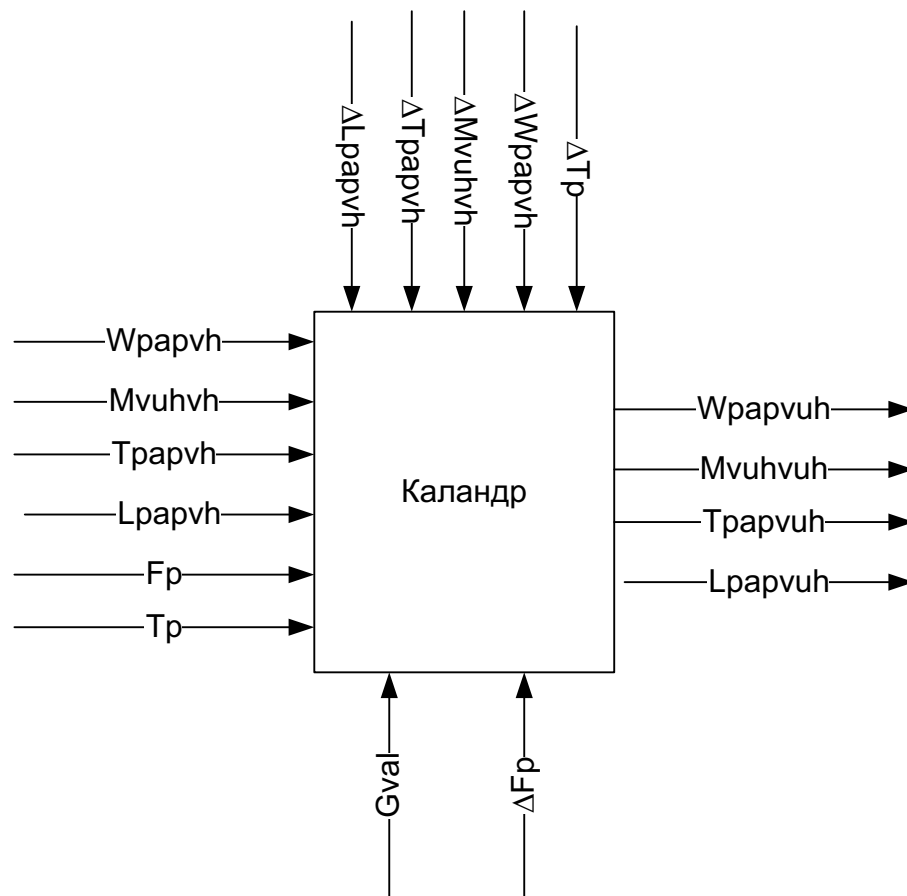


Рисунок 1.8 – Параметрична схема каландра

Згідно параметричної схеми (рис. 1.8), входними змінними є товщина паперу на вході  $L_{papvh}$ , мм., вологість паперу на вході  $M_{vuhvh}$ , %, маса  $1 \text{ м}^2$  паперу на вході  $W_{papvh}$ , г., температура паперу на вході  $T_{papvh}$ , °С, температура пари  $T_p$ , °С, витрата пари  $F_p$ ,  $\text{м}^3/\text{год}$ . Вихідними – товщина паперу на виході  $L_{papvuh}$ , мм., вологість паперу на виході  $M_{papvuh}$ , %, маса  $1 \text{ м}^2$  паперу на виході  $W_{papvuh}$ , г., температура паперу на виході  $T_{papvuh}$ , °С. Збуреннями для даного етапу є

коливання вологості паперу на вході  $\Delta M_{papvh}$ , %, коливання маси  $1 \text{ м}^2$  паперу на вході  $W_{papvh}$ , г., коливання температури паперу на вході  $\Delta T_{papvh}$ , °С, коливання температури пари  $\Delta T_p$ , °С, коливання товщини паперу на вході  $\Delta L_{papvh}$ , мм. Керуваннями – положення валів,  $\Delta G_{val}$ , мм, зміна витрати пари  $\Delta F_p$ ,  $\text{м}^3/\text{год}$ .

На виході з каландра отримують готовий продукт, що відповідає заданим показникам якості і придатний до використання.

### 1.3.9 Сушильна частина як визначальна стадія виробництва паперу

Проведений параметричний аналіз складових частин папероробної машини показав, що ПРМ є складним багатостадійним об'єктом, на який діють численні контрольовані і неконтрольовані збурення, що ускладнюють процес отримання якісного кінцевого продукту. З аналізу видно, що сушильна частина ПРМ має найбільшу кількість вхідних, вихідних та збурювальних впливів і є лідером серед використання матеріальних та енергоресурсів:

1. вага сушильної частини без урахування допоміжного обладнання становить приблизно 70% від загальної ваги машини;
2. вартість обладнання доходить до 60% вартості всієї машини;
3. вартість нагрівальної пари для сушіння паперового полотна 10 - 20% від вартості готової продукції;
4. потужність, що споживає сушильна частина становить більше 60% від загального споживання;
5. більше 70% показників якості готової продукції залежать від температурного режиму сушіння.

Всі ці факти свідчать про необхідність приділення максимальної уваги до вдосконалення даного технологічного процесу. Найбільш перспективним напрямком є розроблення, на основі сучасних досягнень науки і техніки, системи автоматичного керування, що забезпечить функціонування технологічного процесу

в рамках актуальних тенденцій енерго- та ресурсозбереження та вимог до якості кінцевого продукту.

#### 1.4 Сучасний стан питання розробки автоматизованих систем керування технологічним процесом сушіння паперового полотна

У випадку застосування комплексних рішень [10-16], їх робота ґрунтується на вимірюванні основних параметрів паперу за допомогою спеціальних сканерів. Далі інформація передається на регулятори де виробляється керувальний вплив і на його основі відбувається корегування вхідних параметрів системи. У якості вимірювальних датчиків використовують сканери якості паперу, які зображено на рис. 1.9.

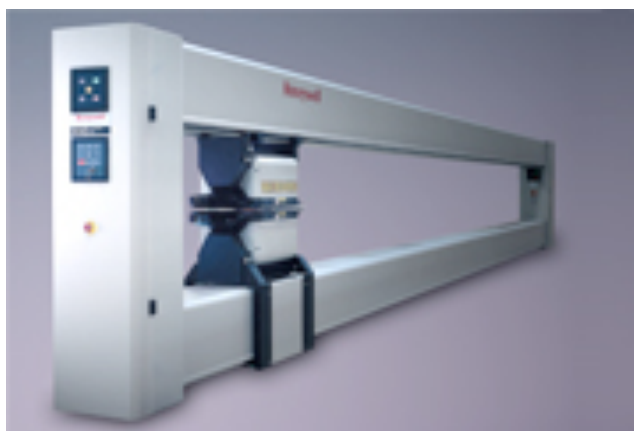


Рисунок 1.9 – Сканер якості паперу

Сканер являє собою сталюю конструкцію, що розрахована на великі навантаження. Такі пристрої використовуються на папероробних машинах до 12,7 м завширшки, в різних її частинах за температури оточуючого середовища від 15 до 70 °С та відносній вологості 10 – 95 %.

Система з використанням такого сканера виконує наступні функції:

1. первинна обробка сигналів датчика (шумова фільтрація);

2. розділення сигналів на складові у паралельному і поздовжньому напрямі коливання параметрів;
3. візуалізацію та зберігання інформації;
4. калібрування датчиків за допомогою аналізу роботи системи і отриманих показників.

На основі сканера розроблена система керування [12], що забезпечує наступні функції:

1. керування профілем маси  $1 \text{ м}^2$  шляхом регулювання витрати води за шириною напускного пристрою;
2. керування профілем маси  $1 \text{ м}^2$  шляхом регулювання ступеня відкриття губи за шириною напускного пристрою;
3. керування профілем вологості полотна шляхом регулювання витрати пари на спорски, який встановлений у мокрій частині машини (сітка, прес);
4. керування профілем вологості полотна шляхом регулювання подачі інфрачервоної енергії в секційні випромінювачі, що встановлені у сушильній частині;
5. керування профілем вологості полотна шляхом регулювання витрати води на розпилювальних форсунках, встановлених у сушильній частині машини;
6. керування профілем гладкості полотна шляхом регулювання парових спорсків каландрових валів.

Використання комплексних рішень є надзвичайно ефективним способом керування такими складними системами, як папероробна машина. Однак, з метою покращення роботи таких систем, постає питання більш детального вивчення кожної складової частини машини та визначення елементів, що потребують більш чіткого керування.

В останні роки було опубліковано велику кількість робіт із створення систем автоматичного керування процесом сушіння паперового полотна [17-24]. Серед вітчизняних досліджень варто виділити роботи Грінченка І.А. і Буйлова Г.П. [17, 18]. Авторами було обрано різні стратегії управління системою і поставлено різні

завдання. В роботі [17] автор, з метою підвищення якості паперу, який виготовляється пропонує наступну стратегію побудови системи управління:

- на основі інформації про роботу обладнання і заданих параметрах продукції, що випускається аналізується стан папероробної машини і формуються оцінки режиму експлуатації;

- в режимі нормальної експлуатації проводиться стабілізація вологості готового паперу шляхом зміни завдань регуляторам тиску пари в сушильних групах;

- в момент обриву полотна регулятор вологості паперу відключається і запам'ятовуються поточні температури поверхні сушильних циліндрів. Ці температури приймаються як завдання стабілізуючим регуляторам, які включаються в роботу циліндрів шляхом впливу на завдання регуляторів тиску пари в групах. Залежно від тривалості холостого ходу настройки регуляторів температури можуть коригуватися;

- після заправки полотна регулятори температури циліндрів відключаються і включається регулятор, що стабілізує вологість готового паперу;

- в режимі зміни виду продукції управління вологістю готового паперу здійснюється з використанням стабілізуючого і компенсуючого регуляторів. Останній забезпечує незалежність (інваріантність) вологості щодо змін маси  $1 \text{ м}^2$  полотна.

В роботі [18] наводиться більш об'ємна задача. Основна мета автоматизації сушіння паперового полотна в сушильній частині папероробної машини полягає у регулюванні температурного режиму сушіння і отриманні паперу оптимальної та рівномірної вологості.

Ще однією сучасною стратегією роботи систем автоматичного керування сушильною частиною ПРМ є забезпечення найбільш низького співвідношення витрати пари та кількості вилученої води з полотна паперу [19].

Всі сушильні циліндри розбиваються на кілька груп, щоб між паровими колекторами, а також між паровим колектором і колектором конденсату кожної сушильної групи утворювався відповідний перепад тиску. Основними регульованими параметрами є: тиск пари, перепад тиску, рівні в водороздільниках,

вологість і маса  $1 \text{ м}^2$  паперу. Тиск пари в колекторі кожної сушильної групи і в головному паровому колекторі регулюється за допомогою локальних АСК (поз. 1, рис. 1.10).

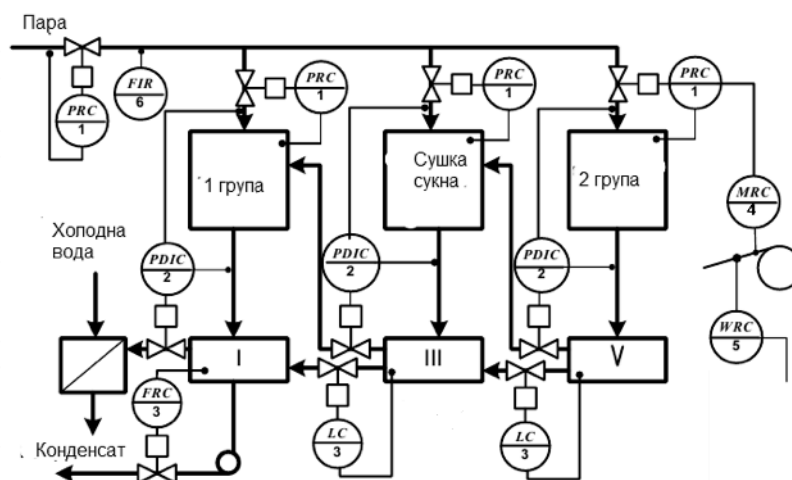


Рисунок 1.10 – Схема автоматизації сушіння паперового полотна

Перепад тиску між паровим колектором і колектором конденсату кожної сушильної групи регулюється зміною витрати нагрівальної пари.

Регулювання вологості паперу відбувається за каскадною схемою: вихід з регулятора вологості (поз. 4, рис. 1.10) використовується як завдання регулятора тиску пари в основній сушильній групі (III).

Маса  $1 \text{ м}^2$  паперу регулюється (поз. 5, рис. 1.10) шляхом зміни витрати паперової маси перед змішувальним насосом.

Загальні витрати пари на сушіння контролюються АСК витрати пари (поз. 6, рис. 1.10).

Серед зарубіжних авторів варто виділити роботи науковців: Akesson J., Ekvall J., Bassily A., Radha R., Slätteke O.[20-24].

В роботі Bassily, A.[21] ставиться задача мінімальної річної вартості виробництва, що розглядалась з обмеженнями на 8–10 основних параметрів якості і розв'язувалася за допомогою методів прямого пошуку та змінної метрики.

Автор роботи [23] розділяє задачу сушіння на дві частини:

- керування тиском пари всередині сушильних циліндрів;
- керування профілем вологості паперового полотна.

Для розв'язання цих задач було використано ПІ- та ПІД-регулятори. В ході роботи були розглянуті два нові підходу до контролю вологості за допомогою зворотного зв'язку. Перший використовує повітря навколо паперу за всією довжиною сушильної частини в поєднанні із сушильними циліндрами, щоб поліпшити продуктивність сушіння. Другий підхід базується на керуванні тільки останньою частиною сушильної секції для досягнення необхідного значення вологості кінцевого продукту, в той час як перша частина залишається незмінною.

Проблемою всіх зазначених вище рішень є розгляд сушіння як однотипного процесу на всіх сушильних циліндрах. Як показали дослідження [28-30], він складається з трьох періодів: прогрівання паперового полотна, безпосередньо сушіння та досушування. Кожен з цих етапів характеризується своїми особливостями тепло- та масоопереносу та різними задачами з точки зору керування. На першому етапі необхідно якомога швидше довести температуру паперового полотна до робочого значення, за якого починає відбуватися ефективне видалення вологи. Встановлено, що динаміка протікання процесу прогрівання є визначальною для більшості параметрів якості готової продукції. Визначено, що складність даного процесу полягає в тому, що для забезпечення високих параметрів якості необхідне поступове збільшення температури полотна і запобігання його перегрівання.

На другому – необхідно виділити максимальну кількість вологи з паперового полотна. На третьому – вирівняти температурне та вологовмісне поле паперового полотна.

Виходячи з цього, є необхідність реалізувати систему керування кожним з етапів окремо, що надасть можливість, у подальшому, створити комплексне рішення для оптимального керування всім процесом сушіння.

## 1.5 Постановка завдання дослідження

Технологія виробництва паперу – це дуже ресурсо-, енерго- та капіталозатратний процес. Серед усіх технологічних процесів на ПРМ найбільш затратним є видалення води з паперового полотна. Воно відбувається за допомогою серії послідовних стадій поки не буде досягнуто задане значення вологості паперового полотна. Спочатку видалення води відбувається шляхом дренажу на сітковому столі і вакууму на відсмоктувальних ящиках. Коли полотно паперу досягає вологості 75 – 80% (в залежності від виду паперу), воно переходить в пресову частину, де волога видаляється за допомогою механічних пресів. Це найбільш економічна секція видалення води і тому на ній намагаються видалити максимально можливу кількість вологи. Однак, даним способом неможливо видалити всю зайву вологу. Після досягнення максимально допустимого значення, подальше механічне зневоднення призводить до руйнування внутрішньої структури полотна і негативно позначається на якості готової продукції. Тому остаточне видалення вологи можливо тільки термічним способом у сушильній частині ПРМ. Її вміст в папері, що надходить у сушильну частину, залежить від ефективності пресів і може складати від 60 до 75%. Після сушіння вологість коливається у межах від 5 до 10% [2].

Як видно з вище викладеного, значна частина води видаляється саме на стадії сушіння паперового полотна. Витрати на сушіння складають 30 – 40% від загальної вартості виробництва паперу. В свою чергу, з точки зору якості готової продукції і загальних витрат на сушіння, визначальним є процес прогрівання паперового полотна.

Тому завдання оптимального керування процесом прогрівання паперового полотна у сушильній частині ПРМ є найбільш актуальним завданням на сьогоднішній час.

Для створення ефективної системи керування процесом сушіння паперового полотна, яка б враховувала технологічні вимоги до якості готової продукції,

конструкційні особливості геометрії сушильної частини та сучасні вимоги до ресурсо- та енергозбереження, мають бути розв'язані наступні основні завдання:

- проаналізувати існуючі математичні моделі тепло- та масопереносу за контактного та конвективного сушіння та на їх основі вдосконалити математичну модель процесу прогрівання паперового полотна як визначального етапу сушіння, що надасть змогу перевірити розроблені рішення для системи автоматичного керування;

- сформулювати критерій і основні задачі для системи оптимального керування процесом прогрівання паперового полотна;

- розробити систему оптимального керування у відповідності до визначеного критерію та поставлених задач;

- дослідити ефективність розробленої системи керування процесом прогрівання паперового полотна.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Розглянуто технологічні процеси, що використовуються для виробництва паперового полотна, будову та функції кожної з частин папероробної машини, створено їх параметричні схеми, як об'єктів автоматичного керування.

2. Обґрунтовано визначальну роль стадії сушіння паперового полотна у роботі всієї папероробної машини.

3. Визначено вхідні, вихідні параметри кожного з технологічних етапів виробництва на ПРМ, а також збурювальні впливи, на основі аналізу яких, а також об'ємів енерго- та матеріалозатрат визначено, що сушильна частина потребує вдосконалення. Одним з напрямків вдосконалення є розробка нової системи керування, що має враховувати особливості даного технологічного процесу, вимоги до параметрів якості готової продукції, енергоефективності протікання технологічного процесу та обмеження на керувальні впливи.

4. Проведено аналіз існуючих систем керування сушильною частиною папероробної машини, визначено їх слабкі сторони та можливий напрямок їх вдосконалення.

5. Проведений аналіз робіт показав, що в технічній літературі відсутні математичні моделі процесу прогрівання паперового полотна, що враховують особливості протікання тепло- та масообмінних процесів та можуть бути використані для синтезу системи керування.

6. В проаналізованих літературних джерелах відсутня інформація про вибір критерію якості керування процесом прогрівання паперового полотна, як окремої етапу процесу сушіння паперового полотна.

7. Сформульовано основні завдання дослідження.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОГРІВАННЯ ПАПЕРОВОГО ПОЛОТНА В СУШИЛЬНІЙ ЧАСТИНІ ПАПЕРОРІБНОЇ МАШИНИ

#### 2.1 Обґрунтування необхідності та постановка завдання математичного моделювання процесу прогрівання паперового полотна

В ході роботи над створенням систем автоматичного керування будь-яким технологічним процесом постає задача перевірки ефективності розроблених технічних рішень на реальному об'єкті.

Сушіння паперового полотна відноситься до безперервних, швидкоплинних процесів, які є невід'ємною частиною складного технологічного процесу виробництва паперового полотна на ПРМ. Як показує практика, проведення експериментальних досліджень роботи нової системи керування безпосередньо на такому типі об'єктів пов'язано з високозатратними та аварійно небезпечними процесами.

У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення математичної моделі процесу сушіння і етапу прогрівання паперового полотна [31]. У результаті це дозволить без втручання у технологічний процес дослідити створену систему керування та, за необхідності, внести корективи в її роботу.

В результаті аналізу технологічного процесу сушіння було встановлено, що, незважаючи на велику подібність, сушильна частина кожної ПРМ має свої конструкційні та технологічні особливості. Особливості її будови в основному залежать від виду паперу, який буде виготовлятися.

Дана специфіка, у випадку розв'язання поставленої задачі створення математичної моделі для конкретної сушильної частини, накладає суттєві обмеження на її універсальність та подальше використання і тому є недоречною. Як показує практика [32], в таких випадках доцільним є розробка адаптивної

математичної моделі, що може бути підлаштована під умови та обмеження технологічних параметрів, які змінюються, та особливостей виробництва.

Питанням моделювання процесу сушіння приділяли велику увагу як вітчизняні [17, 28, 33 - 37], так і іноземні фахівці [38 - 42]. Вагомий внесок для даних досліджень внесли вчені Льюїс, Шервуд, Ликов А.В., Красніков В. В. [28, 33, 38, 39]. Саме ними було створено основні рівняння кінетики тепло- та масопереносу в капілярно-пористих колоїдних тілах і на їх досягнення доцільно спиратися в ході обґрунтування проведення досліджень з побудови математичної моделі даного процесу.

В роботі [17] пропонується використовувати методику наближеного моделювання процесу теплопередачі на сушильні циліндри ПРМ. Суть методики полягає в апіорі заданій структурі моделі, що передбачає єдину її структуру для всіх етапів сушіння. Однак, як показали дослідження [28 - 30], фізика процесу тепло- і масопереносу відрізняється для різних стадій процесу перенесення вологи і тепла (дифузійний, фільтраційний та фільтраційно-дифузійний вид перенесення) і узагальнена модель може використовуватися тільки для наближеного розрахунку. Для створення оптимальної системи автоматичного управління цього недостатньо. Тому необхідно більш детальний розгляд всіх стадій даного технологічного процесу.

У роботах [33-35] авторами показано побудовані математичні моделі сушіння паперового полотна відповідно до праць Ликова А.В. [28]. На відміну від положень, наведених в роботі [17], в них розглядається процес сушіння, розділений на етапи і для кожного з них побудовані моделі, які відповідають законам тепло- і масопереносу, що проходять в певний момент. Математична модель наведена [36] у вигляді системи диференціальних рівнянь, а також показано їх аналітичне розв'язання. Окремо розглядаються контактна і конвективна частина сушки. Ще однією перевагою цих моделей, є обґрунтування виду градієнта температури і вологості за товщиною матеріалу у вигляді параболи. У цих же роботах формулюється припущення, що в кінці сушіння значення температури і вологості будуть однакові за всією товщиною паперу. Дане твердження не завжди відповідає

дійсності, що було показано в роботах [28, 38]. Воно може бути використано тільки у випадку тонких видів паперу. Для більш товстого матеріалу необхідно при використанні математичних моделей, запропонованих в даних роботах, розраховувати параметри за товщиною паперу. В ході аналізу робіт [40 – 42] видно, що в результаті тривалого розрахунку отримана велика кількість даних, які ускладнюють аналіз роботи системи і це позначиться на швидкодії системи управління.

Аналіз існуючих математичних моделей [17, 28, 33 - 42] показав, що на сьогоднішній день актуальним науковим завданням є розроблення нової математичної моделі з меншою кількістю розрахункового матеріалу, яка дозволить отримувати значення температури і вологості матеріалу в будь-який момент часу в ключових за товщиною паперу точках.

Для цього, в ході розробки адаптивної математичної моделі процесу прогрівання паперового полотна необхідно враховувати особливості сушильної частини. Їх можна розділити на декілька класів:

- конструкційні параметри;
- геометричні параметри;
- технологічні параметри.

До основних конструкційних параметрів необхідно віднести:

- матеріал сушильних циліндрів;
- кількість сушильних циліндрів;
- конструкція конденсатовідвідників;
- конструкція системи вентиляції.

До основних геометричних параметрів необхідно віднести:

- вид розташування сушильних циліндрів;
- горизонтальна та вертикальна відстань між сушильними циліндрами;
- положення натяжних валиків.

До основних технологічних параметрів необхідно віднести:

- вид паперу, що виробляється;

–пропускна спроможність трубопроводу підводу пари для нагрівання циліндрів;

–параметри паперу на вході в сушильну частину.

Задачею математичного моделювання у даній роботі є вдосконалення існуючих математичних моделей [17, 33-42] сушіння паперового полотна, шляхом врахування в них зазначених вище параметрів і особливостей процесу прогрівання паперового полотна.

## 2.2 Розроблення математичної моделі процесу сушіння паперового полотна

### 2.2.1 Особливості тепло- та масопереносу в технологічному процесі сушіння паперового полотна

В процесі проходження по сушильній частині машини вологе паперове полотно огинає частину бічної поверхні нагрітих циліндрів, сприймає теплоту, нагрівається і з нього випаровується волога. Передача теплоти від нагрітої поверхні циліндрів до паперового полотна здійснюється шляхом безпосереднього дотику - контакту або кондукції.

На ділянці вільного пробігу між циліндрами, полотно матеріалу стикається з навколишнім повітрям, в результаті чого відбувається інтенсивне випаровування вологи за рахунок теплоти, що була акумульована паперовим полотном на циліндрах і теплообміну з навколишнім середовищем.

Відомо [28], що переміщення вологи у матеріалі відбувається у вигляді рідини і пари за наявності насиченого і ненасиченого шару пористої структури біля нагрівальної поверхні. Відповідно будуть і різні процеси тепло- і масопереносу. Інтенсивність контактнo-конвективного сушіння паперу визначаються зовнішніми і внутрішніми умовами процесів, в залежності від яких в матеріалі відбуваються

наступні механізми тепломасопереносу: дифузійний, фільтраційний та фільтраційно-дифузійні. На кожному етапі сушіння діють свої специфічні механізми переносу теплоти і пари, які описуються різними диференціальними рівняннями.

На етапі прогрівання полотна, перенесення тепла і маси протікає по дифузійному механізму.

У випадку розгляду процесів тепломасообміну на циліндрах і на ділянках вільного ходу слід враховувати параметри повітря в міжциліндрових просторах, швидкості руху полотна, діаметр і температуру поверхні сушильних циліндрів. Інтенсивність процесів, що протікають визначається, головним чином, тепломасообміном між паперовим полотном та нагрітими сушильними циліндрами і навколишнім повітрям.

### 2.2.2 Математична модель теплогенеру між сушильним циліндром і контактним шаром паперового полотна

Нестационарність тепломасообміну в процесі сушіння паперового полотна на багатациліндрових установках, перш за все обумовлена періодичністю контакту вологого матеріалу з нагрітими циліндрами і навколишнім повітрям, а також періодами сушіння вологих матеріалів. Саме тому доцільно розрахунок кінетики тепломасообміну контактено-конвективних установок проводити за циклами, що включає в себе тривалість перебування полотна на нагрівальній поверхні циліндра  $\tau_{\text{ц}}$  і на ділянці вільного руху  $\tau_{\text{вр}}$  (рис.2.1). Точка 1 є моментом контакту паперового полотна з сушильним циліндром; точка 2 – вихід паперового полотна з СЦ, в цей момент температура паперу є максимальною, в той же час ця точка є початком перебування паперу на ділянці вільного руху; точка 3 – закінчення ділянки вільного руху, мінімальна температура паперового полотна, початок його контакту з наступним сушильним циліндром.

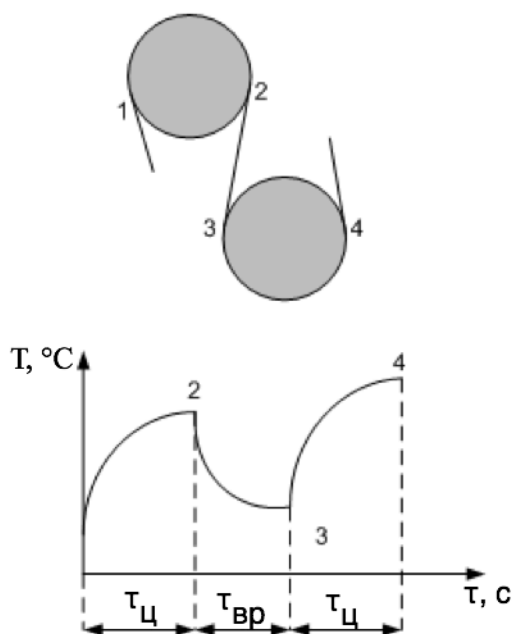


Рисунок 2.1 – Схема контрольних точок контакту паперового полотна із сушильним циліндром і ділянок вільного ходу

Запишемо рівняння теплового балансу і теплообміну під час перебування паперового полотна на сушильному циліндрі (одинична площа) [8]:

$$dq_{\text{КТ}} = \alpha_{\text{КТ}}(t_{\text{Ц}} - t_{\text{П}})d\tau = (c_{\text{СП}} + c_{\text{В}}u_0)P_{\text{СП}}dt_{\text{П}},$$

$t_{\text{Ц}}$ ,  $t_{\text{П}}$  – температура сушильного циліндра і паперового полотна, °С;  $\alpha_{\text{КТ}}$  – коефіцієнт контактного теплообміну, Вт / (м<sup>2</sup>К);  $\tau$  – тривалість контакту паперового полотна із сушильним циліндром, с;  $P_{\text{СП}}$  – маса квадратного метра сухого полотна, г/м<sup>2</sup>;  $c_{\text{СП}}$  – теплоємність сухого паперового полотна, кДж/(кгК);  $c_{\text{В}}$  – теплоємність води, кДж/кгК;  $u_0$  – початковий вміст вологи у паперовому полотні, кг/кг.

Після перетворення отримаємо:

$$\frac{dt_{\text{П}}}{(t_{\text{Ц}} - t_{\text{П}})} = \frac{\alpha_{\text{КТ}}}{(c_{\text{СП}} + c_{\text{В}}u_0)P_{\text{СП}}}d\tau.$$

Проведемо інтегрування останнього рівняння за величиною  $t_{\text{П}}$  і отримаємо:

$$\frac{t_{\text{ц}}-t_{\text{п2}}}{t_{\text{ц}}-t_{\text{п1}}} = e^{\frac{\alpha_{\text{КТ}}\tau_{\text{ц}}}{(c_{\text{сп}}+c_{\text{в}}+u_0)P_{\text{сп}}}}, \quad (2.1)$$

де  $t_{\text{п1}}$ ,  $t_{\text{п2}}$  – температура паперу на початку і в кінці сушильного циліндра, °С.

З виразу (2.1) можна знайти температуру паперу на виході із сушильного циліндра:

$$t_{\text{п2}} = t_{\text{ц}} - \frac{t_{\text{ц}}-t_{\text{п1}}}{e^{\frac{\alpha_{\text{КТ}}\tau_{\text{ц}}}{(c_{\text{сп}}+c_{\text{в}}+u_0)P_{\text{сп}}}}}. \quad (2.2)$$

Даного рівняння достатньо, якщо відбувається сушіння матеріалу малої товщини. У цьому випадку відсутній градієнт температури за товщиною паперу [28].

Температура у всьому перерізі паперу буде однаковою. Це пов'язано з рівномірною температурою полотна на виході з пресової частини та однакою температурі за шириною сушильного циліндра.

У випадку, коли мова йде про товстий матеріал, отримане рівняння, з невеликими перетвореннями, можна використовувати виключно для розрахунку температури контактної шару паперу:

$$t_{\text{кш}} = t_{\text{ц}} - \frac{t_{\text{ц}}-t_{\text{кш0}}}{e^{\frac{\alpha_{\text{КТ}}}{(c_{\text{сп}}+c_{\text{в}}u_{\text{кш}})P_{\text{сп}}}}}. \quad (2.3)$$

де  $t_{\text{кш}}$  – температура контактної шару паперу, °С;  $t_{\text{кш0}}$  – температура паперу на початку сушильного циліндра, °С.

### 2.2.3 Математична модель теплопереносу за товщиною паперового полотна

В процесі нагрівання полотна на сушильних циліндрах в першу чергу підвищується температура граничного шару, в той час як середня частина прогрівається повільніше. Для ефективного процесу сушіння необхідно, щоб після етапу прогрівання, папір за всією його товщиною досяг «робочого» значення температури. У зв'язку з цим, для товстих видів паперу виникає необхідність розрахунку температури середнього шару. Для цього необхідно вивести інше рівняння. В основу буде покладено рівняння нестационарної теплопровідності [43]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon r}{(c_c + c_w u)} \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (2.4)$$

дет– температура, °С;  $\tau$  – тривалість процесу, с;  $x$  – координата;  $a$ – температуропровідність матеріалу, м<sup>2</sup>/год;  $\varepsilon$  – коефіцієнт фазового перетворення;  $u$  – вміст вологи, кг/кг;  $c_c$  – теплоємність сухого матеріалу, кДж/(кг°С);  $c_w$  – теплоємність води, кДж / (кг°С).

У правій частині рівняння присутні два доданки. Перший відображає перенесення теплоти за рахунок теплопровідності, друге – перенесення теплоти за рахунок пари.

З експериментальних даних, отриманих Ликовим А. В. [28], розподіл температури всередині матеріалу за товщиною, має вигляд параболи з вершиною (мінімальна температура) в середньому шарі матеріалу. У зв'язку з цим, рівноцінна заміна рівняння (2.4), на:

$$y = -ax^2 + b,$$

де  $y$  – температура паперового полотна, °С;  $x$  – координата за товщиною матеріалу, м;  $a, b$  – коефіцієнти параболи.

Виходячи із зовнішнього вигляду параболи, для подальшого використання математичної моделі для системи оптимального управління необхідно розрахувати температуру тільки середнього шару паперу.

За граничних умов коефіцієнти  $a$  і  $b$  будуть приймати такі значення:

$$\begin{aligned}x &= 0; \quad b = t_{\text{ц}}, \\x &= R; \\b &= \frac{(t_{\text{кш}} - t_{\text{ц}})}{R^2},\end{aligned}$$

де  $R$  – півтовщина матеріалу,  $t_{\text{ц}}, t_{\text{кш}}$  – температура сушильного циліндра і контактного шару паперового полотна, °С.

Якщо підставити ці значення у рівняння (2.3), отримаємо температуру в перерізі матеріалу:

$$t = \frac{(t_{\text{кш}} - t_{\text{сш}})x^2}{R^2} + t_{\text{ц}}.$$

де  $t_{\text{сш}}$  – температура середнього шару паперового полотна, °С.

Диференціюючи дане рівняння двічі по  $dx$ , отримаємо:

$$\frac{d^2t}{dx^2} = 2 \frac{(t_{\text{кш}} - t_{\text{сш}})}{R^2}.$$

Підставивши у вихідне рівняння (2.4), дістанемо:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = 2a \frac{(t_{\text{кш}} - t_{\text{сш}})}{R^2} - \frac{\varepsilon r}{(c_{\text{сп}} + c_{\text{в}}u_0)} 2a_m \frac{(u_{\text{кш}} - u_{\text{сш}})}{R^2},$$

$de a_m$  – коефіцієнт потенціалопровідності; м<sup>2</sup>/год;  $u_{кш}$ ,  $u_{сш}$  – вміст вологи у контактному та середньому шарі паперового полотна, кг/кг;  $c_{сп}$  – теплоємність сухого паперового полотна, кДж/(кгК);  $c_B$  – теплоємність води, кДж/кгК;  $u_0$  – початковий вміст вологи у паперовому полотні, кг/кг.

Після перетворень, з даного рівняння можна обчислити температуру середнього шару паперу:

$$t_{сш} = t_{кш} - \frac{1}{2a} \left( \frac{\alpha(t_{сш} - t_{кш})}{c_c R^2} + \frac{a_m \varepsilon r (u_{сш} - u_{кш})}{(c_{сп} + c_B u_0)} \right). \quad (2.5)$$

Найбільшу складність в ході розрахунку за цією формулою представляє визначення коефіцієнта  $\varepsilon$ . Його значення отримується лише емпіричним шляхом і відображає частку потоку тепла, що переноситься парою, яка утворюється у шарі матеріалу в загальному потоці тепла. У розрахунок приймається тільки потік тепла, що отримано парою, оскільки потік тепла з рідиною невеликий за рахунок того, що вона має малу ентальпію в порівнянні з парою.

У загальному випадку коефіцієнт  $\varepsilon$  запропоновано [44] розраховувати за формулою, проте даний спосіб є досить складним і вимагає значних додаткових обчислень.

Існує інший підхід до визначення цього коефіцієнта [26]. Його обирають однаковим за всією товщею паперового полотна і він залежить від типу паперу (товщини) та температури, що нагріває циліндр. Його значення можна отримати, обравши відповідну точку на графіку. Графік для визначення коефіцієнта  $\varepsilon$  було отримано за експериментальними даними та наведено у роботі [44].

#### 2.2.4 Математична модель масопереносу на поверхні паперового полотна

На стадії сушіння, що аналізується (процес прогрівання паперового полотна), як показали дослідження [28], випаровування вологи з поверхні матеріалу

відбувається в основному внаслідок різниці парціальних тисків пари біля поверхні матеріалу і навколишнього середовища. Термодифузія на цій стадії практично відсутня, тому її в розрахунок не беремо.

При використанні закону Дальтона Д. [45], процес випаровування можна прийняти за випаровування з вільної поверхні. У ході сушіння поверхні паперового полотна міняються місцями по відношенню до сушильного циліндра, торкаючись до нього по черзі, у зв'язку з цим можна прийняти допущення: значення температури і вологості будуть однакові для кожної сторони паперу. Виходячи з цього, буде розглянуто тільки одна сторона (граничний шар).

Вміст вологи у граничному шарі, на першому етапі, можна розрахувати за формулою [28]:

$$u_{\text{кш}} = u_{\text{кш0}} - \beta_p (p_{\text{п}} - p_{\text{нс}}) \frac{760}{B} \quad (2.6)$$

де  $u_{\text{кш}}$ ,  $u_{\text{кш0}}$  – вміст вологи контактного (граничного шару) на початку і в кінці сушильного циліндра, кг/кг;  $\beta_p$  – коефіцієнт масообміну, віднесений до різниці парціальних тисків, кг/(м<sup>2</sup>\*год\*Па);  $p_{\text{п}}$ ,  $p_{\text{нс}}$  – парціальні тиску на поверхні матеріалу і в навколишньому середовищі, Па;  $B$  – коефіцієнт, що враховує особливості матеріалу, повітря і протікання процесу.

### 2.2.5 Математична модель масопереносу за товщиною паперового полотна

Розрахунок буде проведено за аналогічним принципом, як для температури.

На початку запишемо рівняння нестационарної вологопровідності:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = b_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + b_m b_t \frac{\partial^2 t}{\partial x^2},$$

де  $u$  – вміст вологи у паперовому полотні, кг/кг;  $\tau$  – тривалість процесу, ч;  $bt$  – термоградієнтний коефіцієнт,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $t$  – температура матеріалу,  $^\circ\text{C}$ ;  $x$  – координата;  $b_m$  – потенціал масопровідності,  $\text{м}^2/\text{год}$ .

Перший доданок у правій частині показує кількість вологи, яка переноситься за рахунок градієнта вологовмісту, другий – за рахунок градієнта температур. З огляду на незначність перенесення вологи другої складової нею можна знехтувати. Це є особливістю тільки першого етапу (прогрівання матеріалу) оскільки температура паперу ще не досить висока [2].

Як і розподіл температури, зміна вологості за товщиною паперу відповідає параболі з максимальною точкою у центрі полотна. У зв'язку з цим необхідно знайти саме значення вмісту вологи для середнього шару паперу.

Виконавши аналогічні операції, наведені вище для температури, отримаємо рівняння:

$$u_{\text{сш}} = u_{\text{кш}} + \frac{\beta_p (p_{\text{п}} - p_{\text{нс}}) R^2}{b_m P_m}, \quad (2.7)$$

де  $R$  – півтовщина матеріалу;  $u_{\text{сш}}$  – вміст вологи у середньому шарі паперу, кг/кг;  $u_{\text{кш}}$  – вміст вологи контактного шару, кг/кг;  $p_{\text{п}}$ ,  $p_{\text{нс}}$  – парціальний тиск водяної пари на поверхні та в навколишньому середовищі, Па;  $P_m$  – маса одного квадратного метра паперового полотна,  $\text{кг}/\text{м}^2$ .

У сучасних сушильних машинах використовують притискні сукна з синтетичного матеріалу. Їх особливістю є те, що вони не затримують у собі вологу. Тому розрахунок вологопровідності проводять безпосередньо між папером і навколишнім середовищем без урахування вологості затриманої на полотні.

2.2.6 Математична модель теплопереносу між навколишнім середовищем і контактним шаром паперового полотна на ділянці вільного руху

Для ділянки вільного руху необхідно додатково скласти тільки математичну модель теплообміну між навколишнім середовищем і граничним шаром паперу. Перенесення тепла всередині матеріалу може бути розраховано за формулою (2.5) при заміні температури сушильного циліндра температурою навколишнього середовища. Оскільки випаровування вологи розглядалося вище для відкритої поверхні дана модель переносу вологи буде дійсна і для ділянки вільного руху.

На ділянках вільного руху паперове полотно охолоджується і з нього випаровується волога. Даний процес відбувається під дією різниці парціальних тисків. На поверхні випаровування встановлюється парціальний тиск пари, що відповідає температурі насиченого стану.

Запишемо рівняння теплового балансу у випадку випаровування вологи з поверхні полотна паперу на ділянці вільного ходу за рахунок акумульованої на циліндрі теплоти:

$$\beta_p (p_p - p_{nc}) r dt = P_{сп} (c_{сп} + c_v u_0) dt_{кш}, \quad (2.8)$$

де  $p_p$ ,  $p_{nc}$  – парціальний тиск водяної пари на поверхні та в навколишньому середовищі, Па;  $P_{сп}$  – маса одного квадратного метра паперового полотна, кг/м<sup>2</sup>;  $c_{сп}$  – теплоємність сухого паперового полотна, кДж/(кгК);  $c_v$  – теплоємність води, кДж/кгК;  $u_0$  – початковий вміст вологи у паперовому полотні, кг/кг;  $\beta_p$  – коефіцієнт масообміну, віднесений до різниці парціальних тисків, кг/(м<sup>2</sup>\*год\*Па);  $\tau$  – тривалість перебування паперового полотна на ділянці вільного руху, с;  $t_{кш}$  – температура контактного шару паперового полотна, °С.

Ліва частина рівняння виражає кількість теплоти, передану паперовим полотном навколишньому повітрю за рахунок випаровування вологи. Права частина рівняння відповідає зниженню ентальпії вологого матеріалу.

Інтегрувати рівняння (2.8) не представляється можливим, оскільки в лівій частині знаходяться парціальні тиски, а в правій – температури. У зв'язку з цим, необхідно замінити тиски температурами.

Для різних інтервалів температури паперового полотна вид заміни буде відрізнятися. За основу заміни прийнято закон Шарля (другий закон Гей-Люссака) [46].

Розглянемо спочатку діапазон температур від 0 до 60 °С.

Заміна матиме такий вигляд [46]:

$$\frac{p_{\Pi}}{p_{\text{НС}}} = \frac{t_{\Pi}}{t_{\text{НП}}},$$

У даному випадку маємо пропорційне відношення парціальних тисків і температур.

Виходячи з того, що за атмосферного тиску тиск насиченої пари  $p_{\text{НП}} = 1 \text{ атм}$  і його температура  $t_{\text{НП}} = 100 \text{ °С}$ , то парціальний тиск водяної пари біля поверхні випаровування буде мати вигляд [49]:

$$p_{\Pi} = p_{\text{НП}} \frac{t_{\Pi}}{100} = 1 \frac{t_{\Pi}}{100} = v.$$

Перепишемо рівняння (2.7) у наступному вигляді:

$$\beta_p (v-a)r d\tau = P_{\text{СП}}(c_{\text{СП}} + c_{\text{В}}u) dv. \quad (2.9)$$

де  $a$  – парціальний тиск парів у навколишньому повітрі.

Якщо проінтегрувати рівняння (2.9), можна виразити тиск:

$$p_{\Pi} = \frac{p_{\text{ОВ}} + (p_{\text{П0}} - p_{\text{НС}})}{e^{\frac{\beta_p r \tau_{\text{ВР}}}{P_{\text{СП}}(c_{\text{СП}} + c_{\text{В}}u)}}}. \quad (2.10)$$

Дане рівняння, як зазначено вище, справедливо для діапазону температур від 0 до 60 °С.

Розглянемо наступний інтервал температур від 60 до 80 °С.

Залежність тиску і температур тут матиме іншу форму – квадратичну ( $a = b^2$ ).

У зв'язку з цим заміна буде виглядати наступним чином:

$$\frac{p_{\Pi}}{p_{\text{нп}}} = \left( \frac{t_{\Pi}}{t_{\text{нп}}} \right)^2$$

Звідси рівняння (2.8) буде мати вигляд:

$$\beta_p (v^2 - a^2) r \, d\tau = P_{\text{сп}} (c_{\text{сп}} + c_{\text{в}} u) \, dv.$$

Після інтегрування отримаємо:

$$\frac{(\sqrt{p_{\Pi}} - \sqrt{p_{\text{нп}}})(\sqrt{p_{\Pi 0}} + \sqrt{p_{\text{нп}}})}{(\sqrt{p_{\Pi}} + \sqrt{p_{\text{нп}}})(\sqrt{p_{\Pi 0}} - \sqrt{p_{\text{нп}}})} = 4ae^{\frac{\beta_p r \tau_{\text{вп}}}{P_{\text{сп}}(c_{\text{сп}} + c_{\text{в}} u)}}. \quad (2.11)$$

З цього рівняння можна отримати  $p_{\Pi}$ .

Для діапазону 80 до 100 °С – залежність між тиском і температурою, описується відношенням третього ступеня:

$$\frac{p_{\Pi}}{p_{\text{нп}}} = \left( \frac{t_{\Pi}}{t_{\text{нп}}} \right)^3$$

Після ідентичних перетворень, які були описано вище, отримуємо наступну формулу:

$$\frac{1}{6p_{\text{нп}}^{0,67}} \left( \ln \frac{(p_{\text{нп}}^{0,33} - p_{\Pi}^{0,33})^2}{p_{\text{нп}}^{0,67} + p_{\text{нп}}^{0,33} p_{\Pi}^{0,33} + p_{\Pi}^{0,67}} + \frac{1}{p_{\text{нп}}^{0,67} \sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2p_{\Pi}^{0,33} + p_{\text{ов}}^{0,33}}{p_{\text{нп}}^{0,33} \sqrt{3}} - \ln \frac{(p_{\text{нп}}^{0,33} - p_{\Pi 0}^{0,33})^2}{p_{\text{нп}}^{0,67} + p_{\text{нп}}^{0,33} p_{\Pi 0}^{0,33} + p_{\Pi 0}^{0,67}} + \frac{1}{p_{\text{нп}}^{0,67} \sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2p_{\Pi 0}^{0,33} + p_{\text{нп}}^{0,33}}{p_{\text{нп}}^{0,33} \sqrt{3}} \right) = \frac{\beta_p r \tau_{\text{вп}}}{P_{\text{сп}}(c_{\text{сп}} + c_{\text{в}} u)}. \quad (2.12)$$

З даного рівняння методом ітерацій [47] можна визначити тиск пари на поверхні випаровування.

Після отримання чисельного значення тиску пари на поверхні випаровування можна за допомогою таблиці [48] знайти температуру паперового полотна в кінці ділянки вільного ходу.

Такий спосіб придатний для поодиноких розрахунків температур. Але коли мова йде про створення системи автоматичного управління, доцільно сформулювати на основі табличних даних, залежність між тиском і температурою.

Функціональна залежність, яка найбільш точно відповідає табличним даним [48], може бути записана в такому вигляді:

$$t_{\text{кш}} = 21.844 \ln(p_{\text{п}}) - 2.564 \quad (2.13)$$

Таким чином, для розрахунку температури в кінці ділянки вільного ходу, необхідно визначити тиск (за відповідною формулою) і підставити отримане значення у формулу (2.3). Так, для розрахунку температури в кінці вільного ходу для діапазону початкових температури 0 – 60 °С необхідно в рівняння (2.13) підставити замість  $p_n$ , вираз отриманий в (2.10). В результаті отримаємо:

$$t_{\text{кш}} = 21.488 \frac{p_{\text{ов}} + (p_{\text{п0}} - p_{\text{нп}})}{\frac{\beta_p r \tau_{\text{вр}}}{e^{P_{\text{сп}}(c_{\text{сп}} + c_{\text{в}} u)}}} - 2.564. \quad (2.14)$$

### 2.2.7 Загальна математична модель сушіння на етапі прогрівання паперового полотна

Таким чином, модель, отримана в ході дослідження, складається з двох частин:

1. математична модель контактного сушіння;
2. математична модель конвективного сушіння.

Запишемо рівняння для першого сушильного циліндра і наступної за ним ділянки вільного руху. Для всіх інших ділянок рівняння будуть аналогічними.

Спочатку запишемо загальний вигляд першої складової. Для точності управління температурою і вологістю паперового полотна необхідно знати ці параметри, перш за все, для середнього шару. Узагальнимо отримані раніше рівняння для етапу контактного сушіння.

Для отримання загального рівняння розрахунку температури середнього шару на виході із сушильного циліндра необхідно у рівнянні (2.5) замість  $t_{кк}$  (температура контактної поверхні) поставити вираз (2.3). Для розрахунку вмісту вологи середнього шару у рівнянні (2.7) замість  $u_{кк}$  (вміст вологи у контактному шарі) поставити вираз (2.6). У підсумку, дістанемо наступні рівняння:

$$t_{сш} = \left( t_{ц} - \frac{t_{ц} - t_{кш0}}{\frac{\alpha_{кт}}{e^{(c_{сп} + c_{в} u_{кш}) P_{сп}}}} \right) - \frac{1}{2a} \left( \frac{\alpha \left( t_{сш} - \left( t_{ц} - \frac{t_{ц} - t_{кш0}}{\frac{\alpha_{кт}}{e^{(c_{сп} + c_{в} u_{кш}) P_{сп}}}} \right) \right)}{c_{сп} R^2} + \frac{a_m \epsilon r (u_{сш} - u_{кш})}{(c_{сп} + c_{в} u)} \right); \quad (2.14)$$

$$u_{сш} = \left( u_{кш0} - \beta_p (p_{п} - p_{нп}) \frac{760}{B} \right) + \frac{\beta_p (p_{п} - p_{нп}) R^2}{b_m P_m} \quad (2.15)$$

Для розрахунку значень температури і вмісту вологи на першому циліндрі є всі необхідні дані. Папір на циліндр надходить з відомими значеннями початкової температури і вмісту вологи. Відома температура сушильного циліндра. Наперед задані: коефіцієнт контактної теплообміну, тривалість перебування паперу на циліндрі, маса метра квадратного сухого полотна, теплоємність сухого полотна, теплоємність води, коефіцієнт масообміну, віднесений до різниці парціальних тисків, коефіцієнт  $B$ , відомі парціальні тиски на поверхні матеріалу і в навколишньому середовищі.

Для ділянки конвективного сушіння, аналогічні рівняння можна отримати таким чином: температура середнього шару паперового полотна на ділянці вільного

ходу розраховується за формулою (2.5), при заміні  $t_{кк}$  (температура контактного шару) на вираз (2.13) з використанням відповідної формули для  $p_{п}$ . формула вибирається за температурою паперу на початку вільного ходу, якщо вона знаходиться в діапазоні 0-60 °С необхідно використовувати (2.10), якщо 60-80 °С – то (2.11), якщо 80-100 °С – тоді (2.12). Вологовміст розраховується за формулою (2.7) замість  $u_{кк}$  (вологовміст контактного шару) поставити (2.6).

Остаточні рівняння для конвективної ділянки сушіння мають вид:

$$t_{сш} = (21.488p_{п}-2.564) - \frac{1}{2a} \left( \frac{\alpha(t_c - (21.488p_{п}-2.564))}{c_{сп}R^2} + \frac{a_m \epsilon r (u_{сш} - u_{кш})}{(c_{сп} + c_B u_{сш})} \right); \quad (2.17)$$

$$u_{сш} = \left( u_{кш0} - \beta_p (p_{п} - p_{нп}) \frac{760}{B} \right) + \frac{\beta_p (p_{п} - p_{нп}) R^2}{b_m P_M}. \quad (2.18)$$

Отримана система рівнянь (2.17, 2.18) за перерахованих вище умов та обмеженнях дає змогу розрахувати температуру і вологість середнього і граничного шару паперового полотна при виході із сушильного циліндра і в кінці ділянки вільного руху.

### 2.3 Перевірка адекватності математичної моделі

Для дослідження роботи систем керування процесом прогрівання паперового полотна необхідно перевірити адекватність розробленої математичної моделі процесу реального об'єкту у різних режимах роботи і видах продукції, що виробляється. Для об'єктивного вирішення питання про адекватність чи

неадекватність необхідно мати кількісну оцінку ступеня адекватності моделі реальному об'єкту, яка може бути різною у залежності як від конкретного завдання, так і від ступеня вивченості та формалізації об'єкта управління, що розглядається [49]. На жаль, на сьогоднішній час відсутні універсальні критерії для перевірки адекватності математичної моделі.

У зв'язку з цим постає практична задача у формулюванні даного критерію для процесу прогрівання паперового полотна окремо.

При цьому, слід враховувати, що процес прогрівання є багатовимірним не лінійним об'єктом керування, з впливом зовнішніх, визначених, метрологічних похибок, і внутрішніх «шумів», які викликані впливом не контрольованих та не врахованих параметрів об'єкта. Отже, як вхідні, так і вихідні змінні об'єкта керування є певною мірою випадковими величинами і, значить, у випадку вибору критерію адекватності математичної моделі доцільно використати статистичний підхід.

У роботі [50] для кількісного оцінювання ступеня ідентичності моделі реальному об'єкту пропонується використовувати співвідношення

$$Q_{vy}(t, T) = \frac{D\{M\{Y(t) / x(s); s \in T\}\}}{D\{Y(t)\}},$$

де  $D\{M\{Y(t) / x(s); s \in T\}\}$  – дисперсія умовного математичного сподівання значення вихідної змінної відносно значення вхідної змінної  $X(t)$  за відповідних значень аргументу  $t$ , тобто відносно сукупності значень  $X$  при всіх аргументах  $s$  в області  $T$ ;  $D\{Y(t)\}$  – дисперсія вихідної змінної.

Дана дисперсійна міра ідентичності (ДМІ) характеризує частку загальної дисперсії  $D\{Y(t)\}$  вихідного показника  $Y(t)$ , яка формується вхідними змінними  $X$ , включеними до складу моделі об'єкта. Однак дисперсійна міра ідентичності не дає відповіді на питання про відповідність математичного опису реальному об'єкту. Це пояснюється тим, що дисперсія умовного математичного сподівання вихідної змінної щодо вхідних змінних не є обґрунтованою характеристикою зв'язку між

вихідними і вхідними змінними. Рівність нулю дисперсії умовного математичного сподівання вихідної змінної  $Y$  щодо вхідних  $X$  є необхідною, але не достатньою умовою, що свідчить про відсутність зв'язку між  $Y$  і  $X$ .

Ці та деякі інші міркування призвели до побудови міри ступеня адекватності моделі і об'єкта на базі основних положень теорії інформації [51]. Ентропія  $H\{Y\}$  вихідної змінної  $Y$  розраховується за формулою:

$$H\{Y\} = I\{Y, X\} + H\{Y / X\} ,$$

де  $I\{Y / X\}$  – кількість інформації про  $Y$ , що міститься в  $X$ ;  $H\{Y / X\}$  – середня умовна ентропія  $Y$  щодо  $X$ .

Для дискретних випадкових величин  $Y$  і  $X$  маємо:

$$H\{Y\} = - \sum_{i=1}^N p_i \cdot \log p_i ;$$

$$H\{Y/x\} = - \sum_i \sum_j p_{ij} \cdot \log p\left(\frac{y_i}{x_j}\right) ;$$

$$I\{X, Y\} = \sum_i \sum_j p_{ij} \frac{p_{ij}}{p_i \cdot r_j} ,$$

де  $p_i, r_j$  – ймовірності подій  $Y=y_i$  та  $X=x_j$ ;  $p_{i,j}$  – сумісна ймовірність подій  $Y=y_i$  та  $X=x_j$ ;  $p(y_i/x_j)$  – умовна ймовірність подій за умови  $X=x_j$ .

За інформаційну міру ідентичності (ІМІ) моделі об'єкту прийнята величина:

$$q\{Y, X\} = \frac{H\{Y / x\}}{H\{Y\}} .$$

Розрахунок даної величини вимагає знання повних характеристик вхідних і вихідних випадкових функцій об'єкта, а також взаємозв'язків між ними. Крім того, як ДМІ, так і ІМІ не характеризують ступінь близькості виходів моделі і об'єкта, а

також дані критерії адекватності не дають однозначної кількісної оцінки межі ідентичності моделі та об'єкта.

У практичних інженерних задачах в якості критерію адекватності моделі реальному об'єкту іноді використовують виражене у відсотках середнє або максимальне відхилення якої-небудь статичної характеристики об'єкта управління, розрахованої за моделлю, від відповідної характеристики, отриманої експериментально. Незважаючи на широке поширення такого методу в інженерних дослідженнях, його застосування видається не завжди обгрунтованим з наступних причин.

1. Отримання експериментальної статичної характеристики вимагає суворої усталеності усіх змінних за винятком тих, залежність між якими визначається. У промислових умовах зберегти постійними технологічні змінні протягом тривалого проміжку часу, необхідного для зняття статичної характеристики, вельми складно. У результаті отримана статична характеристика може суттєво відрізняється від істинної.

2. Отримання статичної характеристики для перевірки адекватності вимагає постановки спеціального експерименту. При цьому факт адекватності моделі реальному об'єкту встановлюється за даними, отриманими в умовах функціонування об'єкта в режимі, відмінному від режиму нормальної експлуатації.

3. Модель вважається адекватною об'єкту, якщо максимальне відхилення розрахункової статичної характеристики від експериментальної не перевищує 10-15%. Однак така кількісна оцінка величини допустимого відхилення є суб'єктивною.

Аналіз вище перерахованих методів оцінки дозволяє зробити висновок про доцільність для даного дослідження в якості критерію адекватності математичної моделі реальному об'єкту використовувати статистичні критерії. Застосування цих критеріїв дозволяє встановити кількісні межі адекватності, що, таким чином, дає можливість більш об'єктивно визначати ступінь ідентичності об'єкта і його моделі.

Перший спосіб передбачає перевірку гіпотези про близькість математичних сподівань кожної  $k$ -ї компоненти моделі та реальної системи:

$$H_0 : \mu_k^m = \mu_k^s$$

$$H_1 : \mu_k^m \neq \mu_k^s$$

де  $\mu_k^m$ ,  $\mu_k^s$  – математичні сподівання  $k$ -ї компоненти моделі та системи відповідно.

Проводять  $N_s$  дослідів на системі і отримують по кожній  $k$ -й компоненті відгуків системи вибірки значень  $Y_{kn}^s$ ,  $n = \overline{1, N_s}$ .

Виконують  $N_m$  дослідів на моделі й одержують за тією ж  $k$ -ю компонентою відгуків моделі вибірки значень  $Y_{kn}^m$ ,  $n = \overline{1, N_m}$ .

Звичайно намагаються, щоб обсяги вибірок були однакові ( $N_s = N_m$ ), але натурні експерименти дуже дорогі, тому, зазвичай,  $N_m > N_s$ .

За вибірками обчислюють оцінки математичних сподівань і дисперсій відгуків моделі та системи за допомогою наступних співвідношень:

$$M_k^s = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} y_{ki}^s}{N_s}; \quad M_k^m = \frac{\sum_{j=1}^{N_m} y_{kj}^m}{N_m};$$

$$S_k^{2,s} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} (y_{ki}^s - M_k^s)^2}{N_s - 1}; \quad S_k^{2,m} = \frac{\sum_{j=1}^{N_m} (y_{kj}^m - M_k^m)^2}{N_m - 1}.$$

Перевірка гіпотези  $H_0$  означає, що треба оцінити значущість відмінності вибірових середніх.

За критерій при перевірці гіпотези  $H_0$  використовують  $t$  – статистику[52]:

$$t_k = \frac{|M_k^s - M_k^m|}{\sqrt{\left(\frac{1}{N_s} + \frac{1}{N_m}\right) \frac{(N_s - 1)S_k^{2s} + (N_m - 1)S_k^{2m}}{N}}},$$

де  $N = N_s + N_m - 2$ .

Відомо, що величина  $t$  при справедливості нульової гіпотези має розподіл Стюдента ( $t$  – розподіл) з  $u = N_s + N_m - 2$  степенями свободи[52].

Звичайно задають рівень значущості  $\alpha$  і за таблицею двосторонньої критичної області критерію Стюдента визначають його критичне значення  $t_{kr}$ . У разі, коли виконується умова  $t_k < t_{kr}$ , то гіпотезу  $H_0$  для  $k$ -ї компоненти моделі і системи приймають.

Тільки при близькості усіх компонент векторів  $Y^s$  і  $Y^m$  можна зробити висновок про адекватність моделі об'єкту у цілому.

Другий спосіб передбачає перевірку гіпотези про однорідність двох дисперсій  $S_k^{2,s}$  і  $S_k^{2,g}$  для кожної  $k$ -ї компоненти. Параметр  $S_k^{2,g}$  - це дисперсія відгуків моделі по відношенню до середнього значення відгуків системи.

Її розраховують так [52]:

$$S_k^{2,g} = \frac{\sum_{i=1}^{N_m} (y_{k i}^m - M_k^s)^2}{N_m - 1}.$$

Для перевірки однорідності двох зазначених дисперсій формують статистичні гіпотези таким чином:

$$\begin{aligned} H_0 : \sigma_k^{2,g} &= \sigma_k^{2,s} \\ H_1 : \sigma_k^{2,g} &> \sigma_k^{2,s} \end{aligned}$$

де  $\sigma_k^{2,g}$ ,  $\sigma_k^{2,s}$  – дисперсії генеральних сукупностей відгуків моделі по відношенню до середнього значення відгуків системи та реальної системи відповідно.

У випадку формулювання гіпотез будують правосторонню критичну область, тобто гіпотезу  $H_0$  приймають за виконання умови  $F < F_{kr}$ .

Оскільки  $F$  завжди повинно бути більше 1, у чисельнику записують більшу з двох дисперсій.

Отже, для порівняння дисперсій визначають вибіркоче значення критерію Фішера за виразом:

$$F = S_k^{2,g} / S_k^{2,s}.$$

Після того, як розраховано вибіркоче значення критерію Фішера, за таблицею визначають критичне значення цього критерію  $F_{kr}$ , використовуючи інформацію про ступені вільності  $k_{\text{більш}}, k_{\text{менш}}$  і рівень значущості  $\alpha$ :

$$F_{k_{\text{більш}}, k_{\text{менш}}, \alpha} = F_{kr}.$$

Виконання нерівності  $F > F_{kr}$  вказує на те, що гіпотезу  $H_0$  не можна прийняти і слід визнати відсутність адекватності між  $k$ -ю компонентою відгуків моделі і реальної системи.

Для перевірки на адекватність розробленої математичної моделі були використані експериментальні дані в ході роботи папероробної машини у режимі нормальної роботи.

В якості вихідних параметрів для вимірювання було вибрано температуру паперу на виході з кожного сушильного циліндра і в кінці ділянок вільного руху:

$$T_{\text{ц}} = [T_{1,\text{ц}}, T_{2,\text{ц}} \dots T_{k,\text{ц}}],$$

де  $T_{\text{ц}}$  – масив температур паперового полотна на виході із сушильного циліндра;  $k$  – кількість сушильних циліндрів на ділянці прогрівання паперового полотна;

$$T_{\text{вр}} = [T_{1,\text{вр}}, T_{2,\text{вр}} \dots T_{k,\text{вр}}],$$

де  $T_{\text{вр}}$  – масив температур паперового полотна в кінці ділянки вільного руху.

Результати експериментальних досліджень та даних отриманих на математичній моделі зображено на графіках зміни температури паперового полотна в часі:

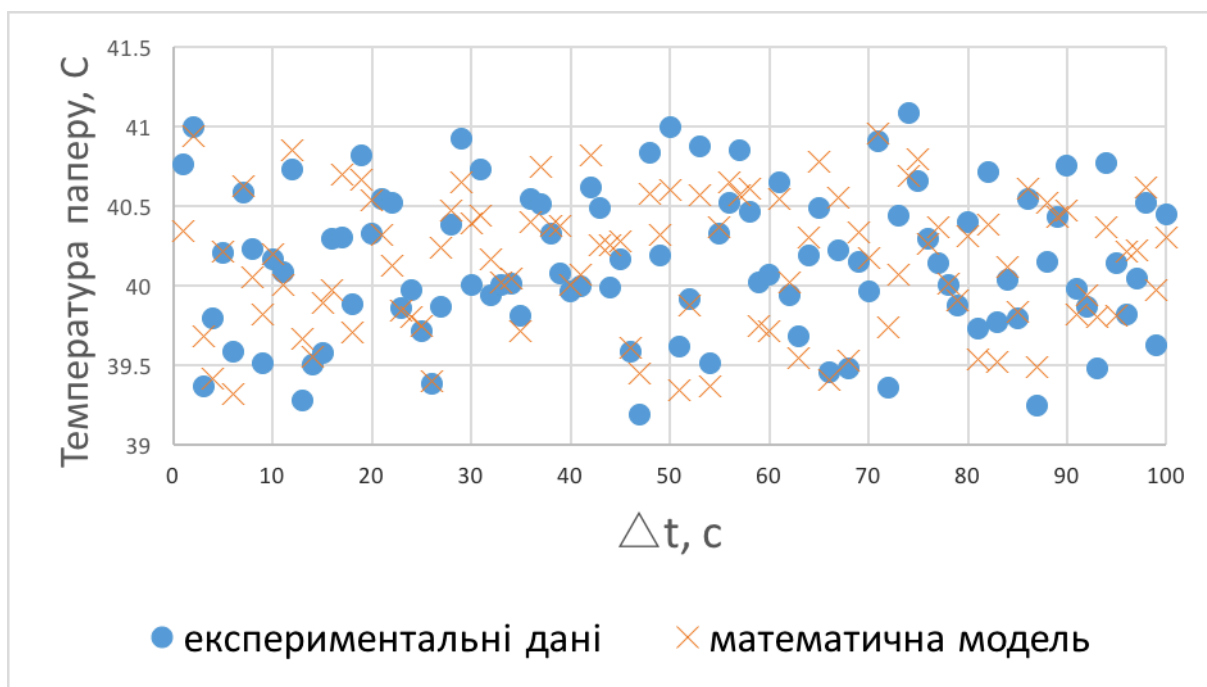


Рисунок 2.2 – Температура паперу на виході із 1-го сушильного циліндра

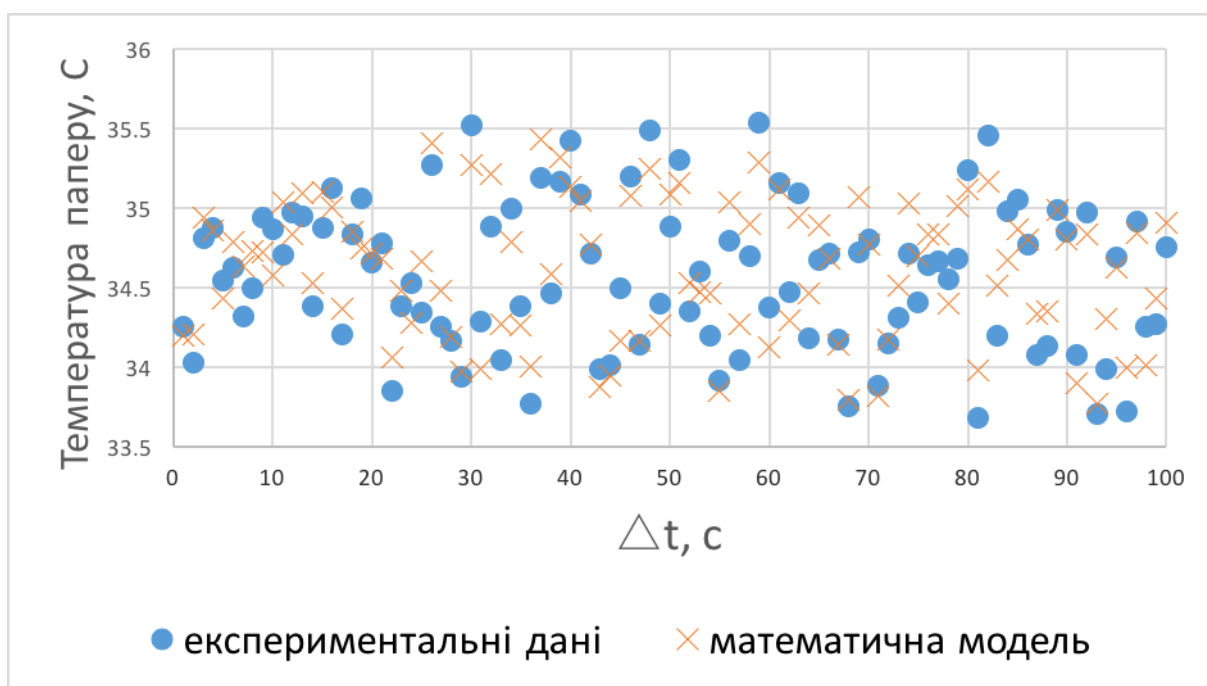


Рисунок 2.3 – Температура паперу на виході із 1-ї ділянки вільного руху

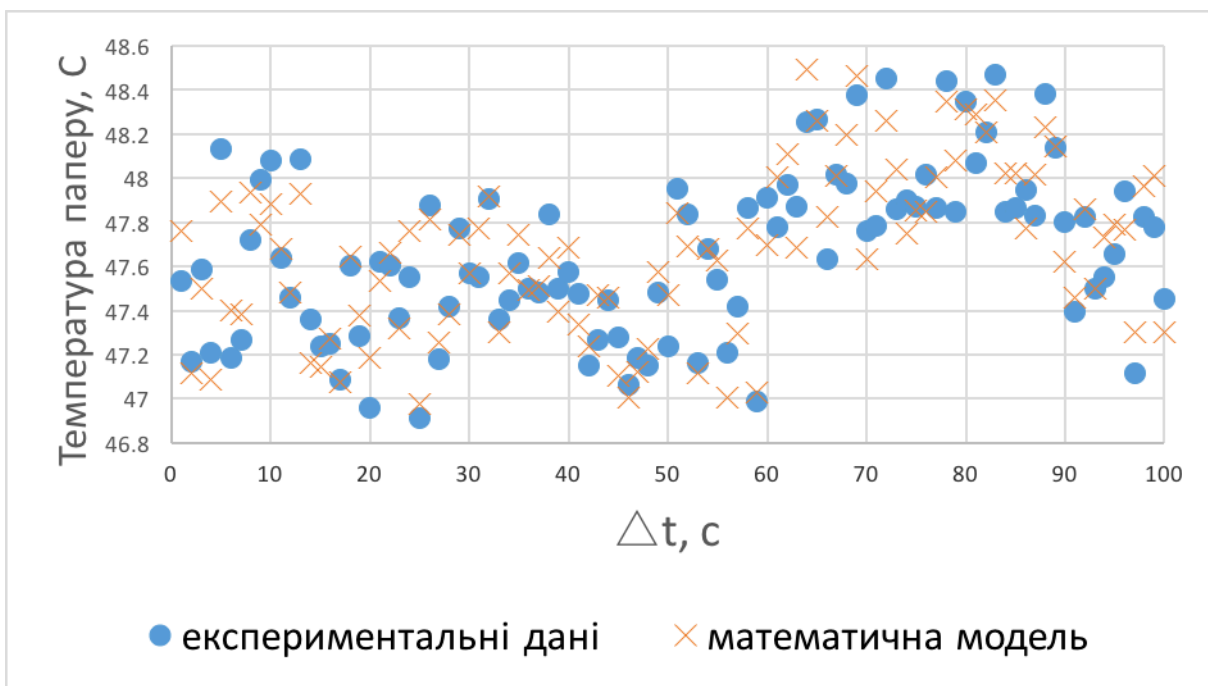


Рисунок 2.4 – Температура паперу на виході із 2-го сушильного циліндра

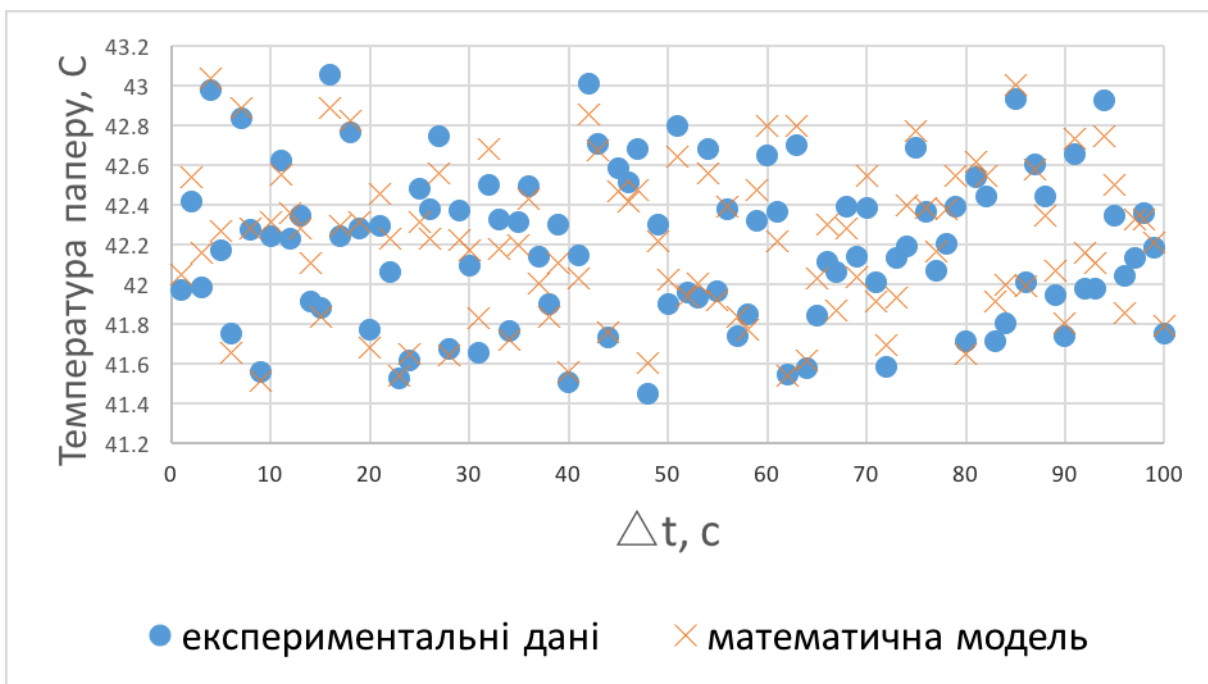


Рисунок 2.5 – Температура паперу на виході із 2-ї ділянки вільного руху

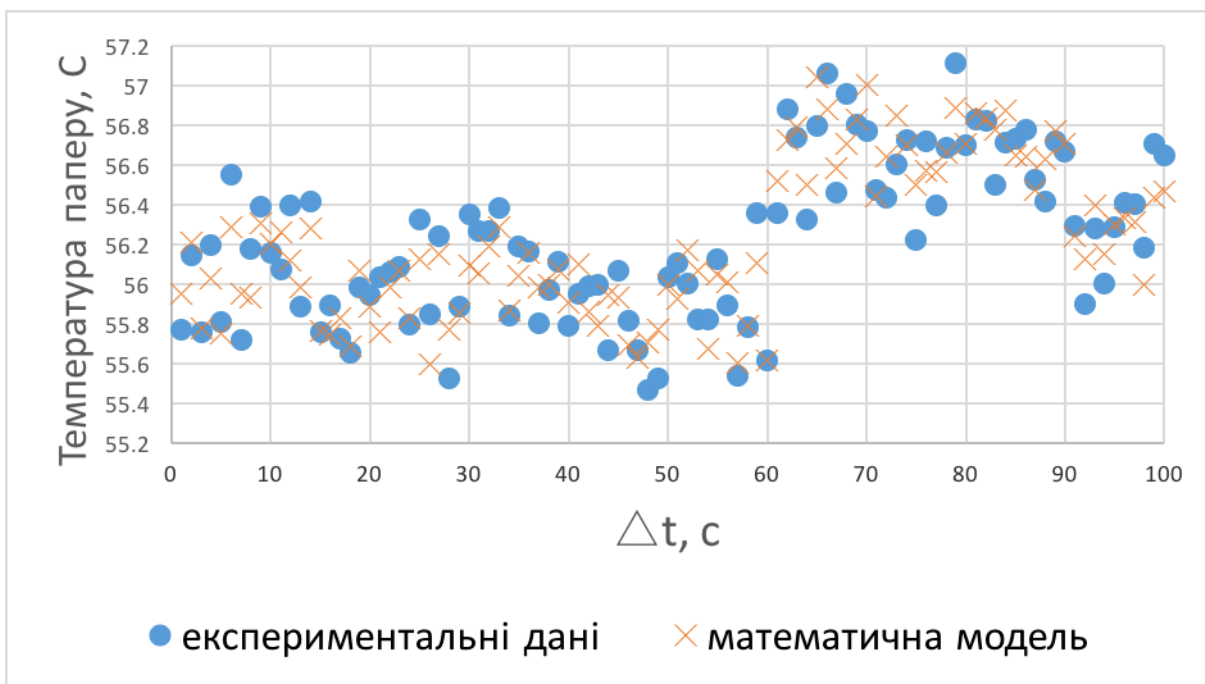


Рисунок 2.6 – Температура паперу на виході із 3-го сушильного циліндра

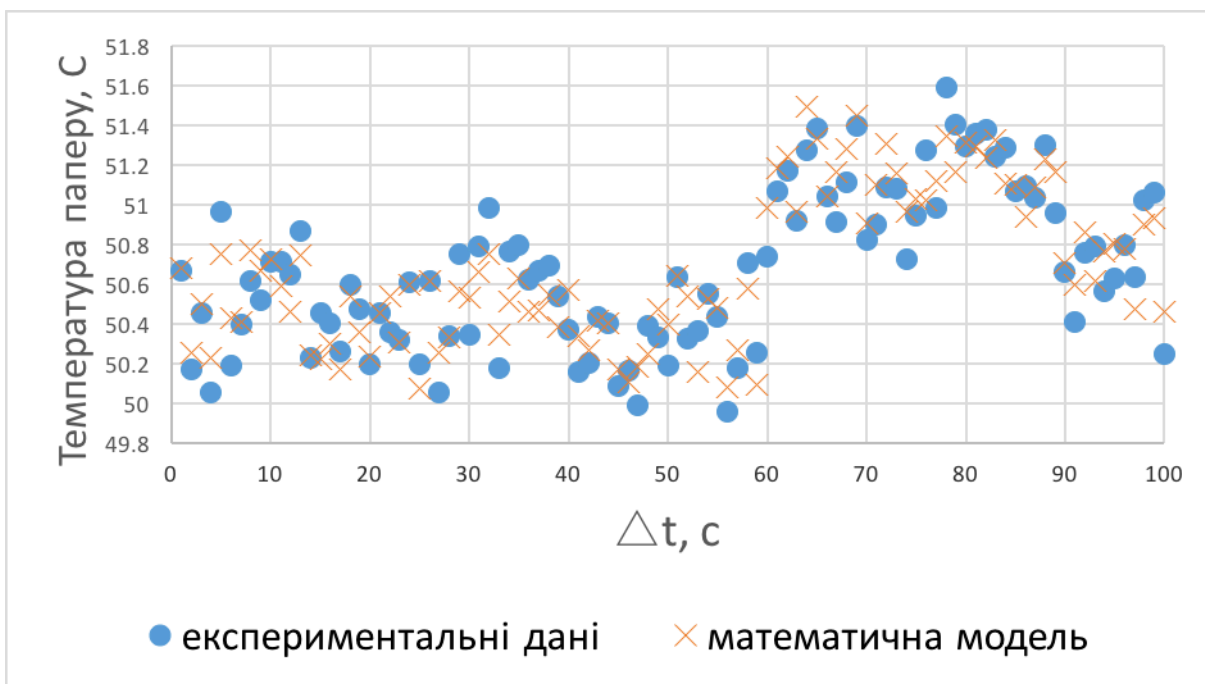


Рисунок 2.7 – Температура паперу на виході із 3-ї ділянки вільного руху

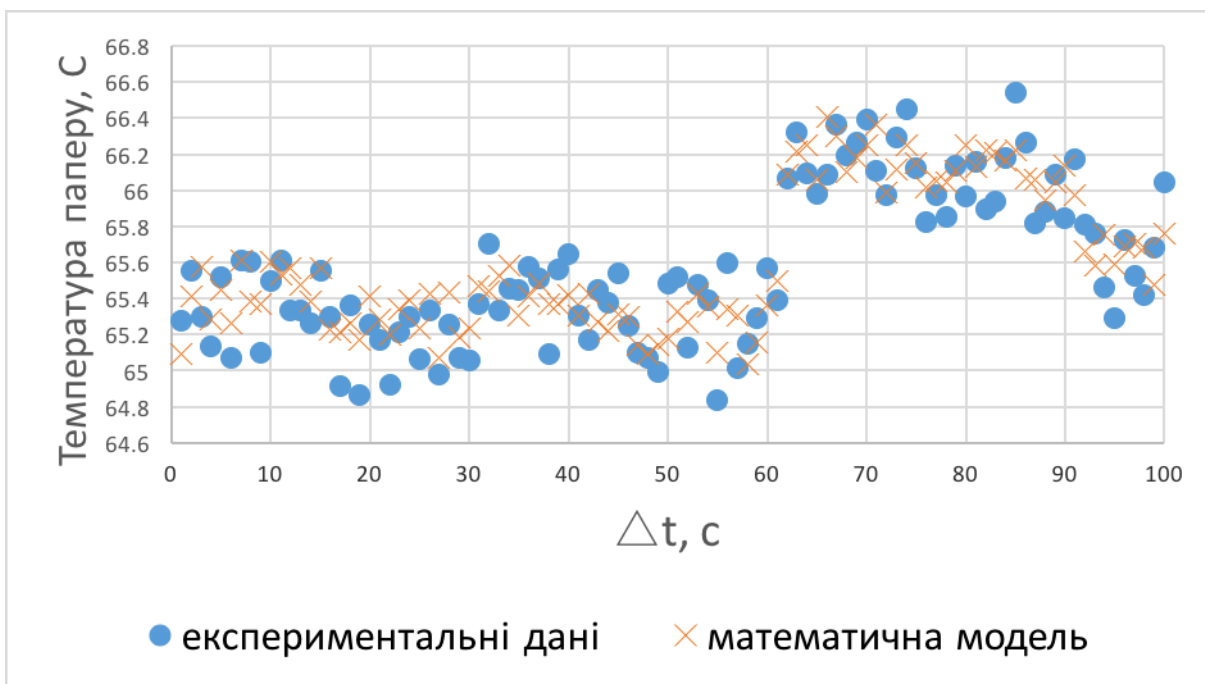


Рисунок 2.8 – Температура паперу на виході з 4-го сушильного циліндра

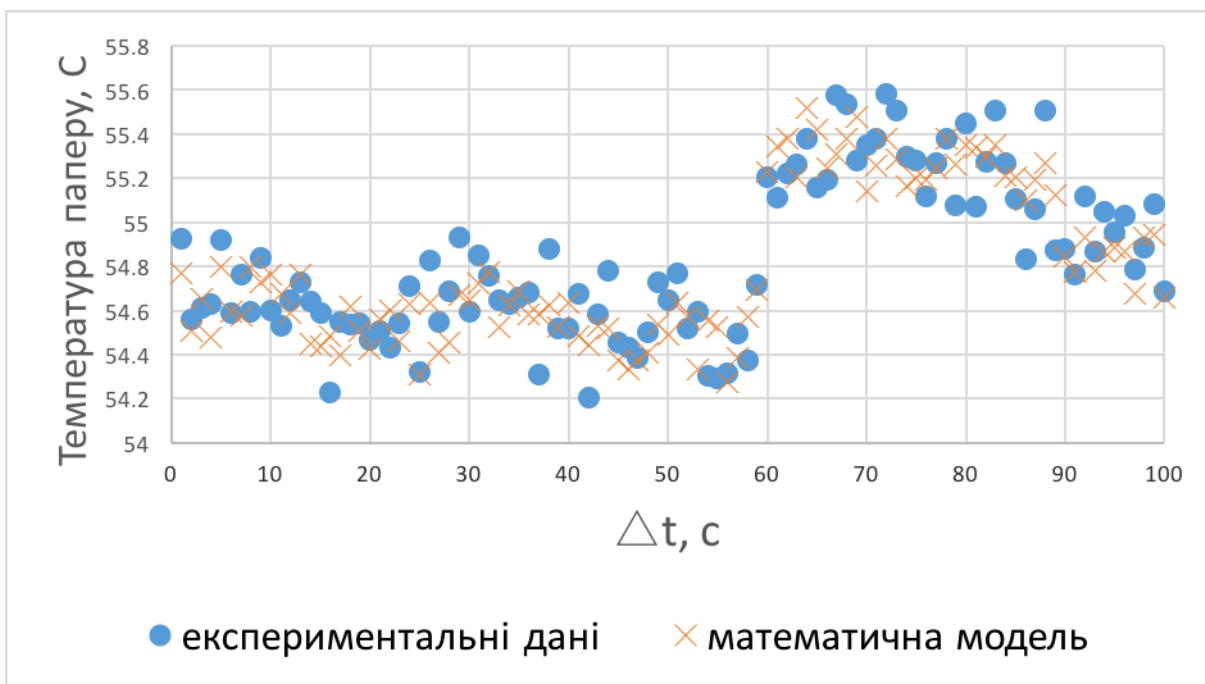


Рисунок 2.9 – Температура паперу на виході з 4-ї ділянки вільного руху

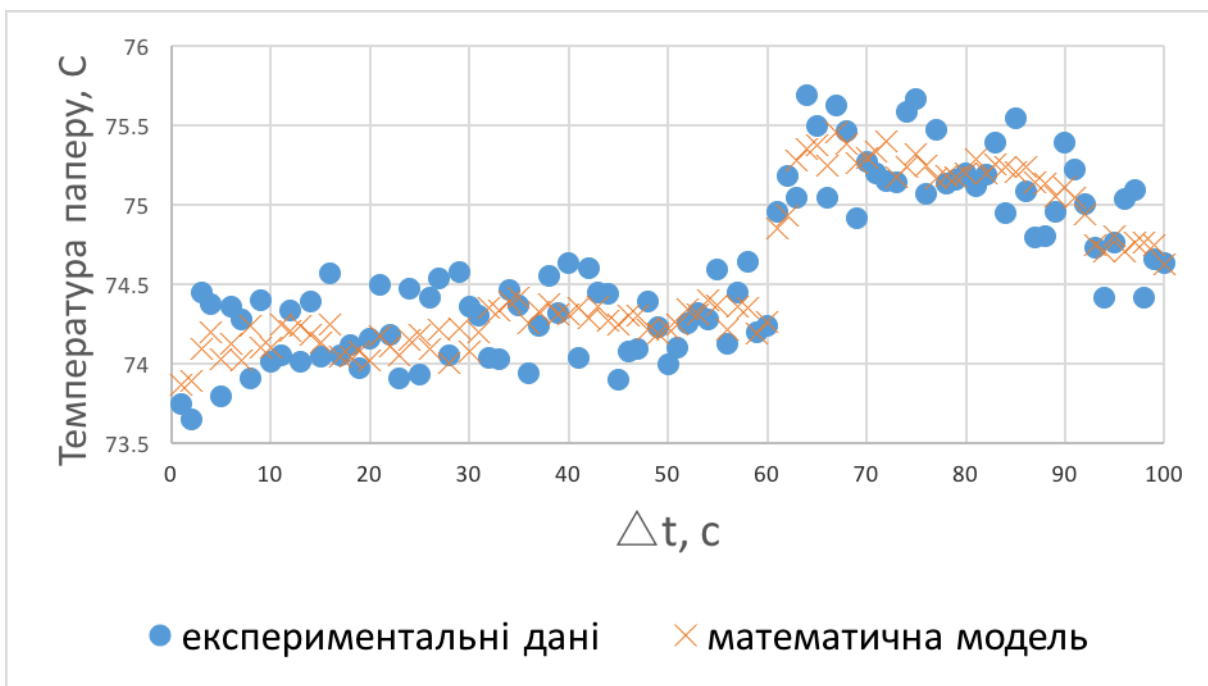


Рисунок 2.10 – Температура паперу на виході з 5-го сушильного циліндра

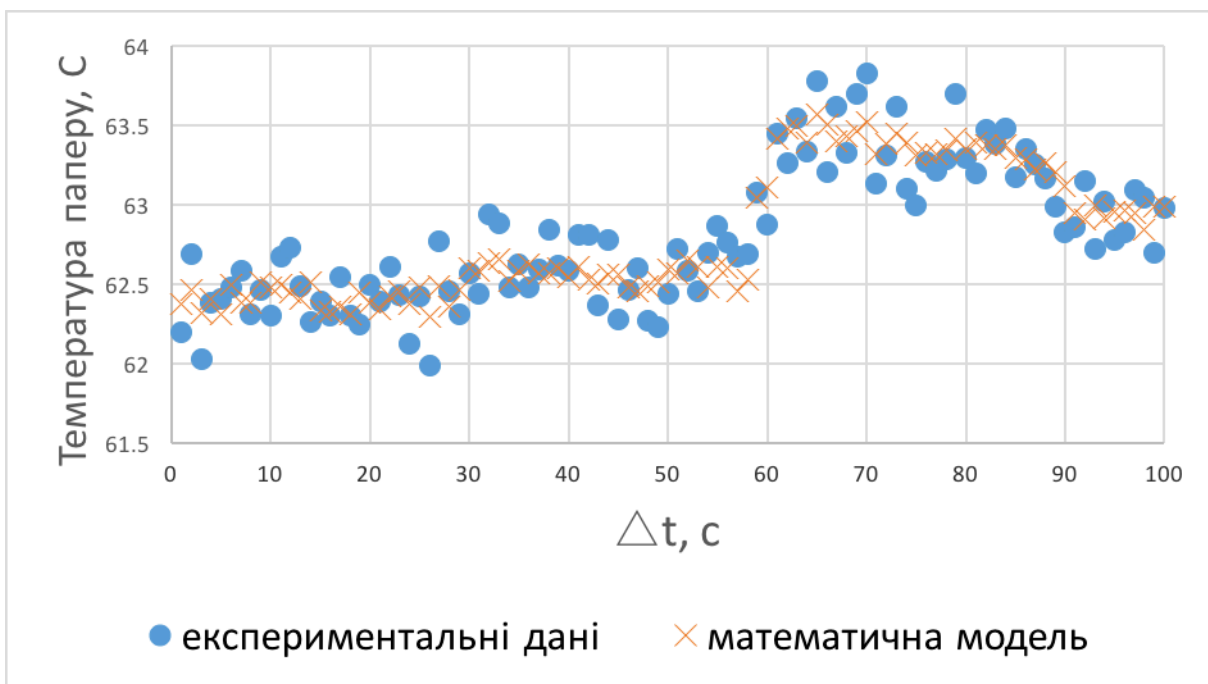


Рисунок 2.11 – Температура паперу на виході з 5-ї ділянки вільного руху

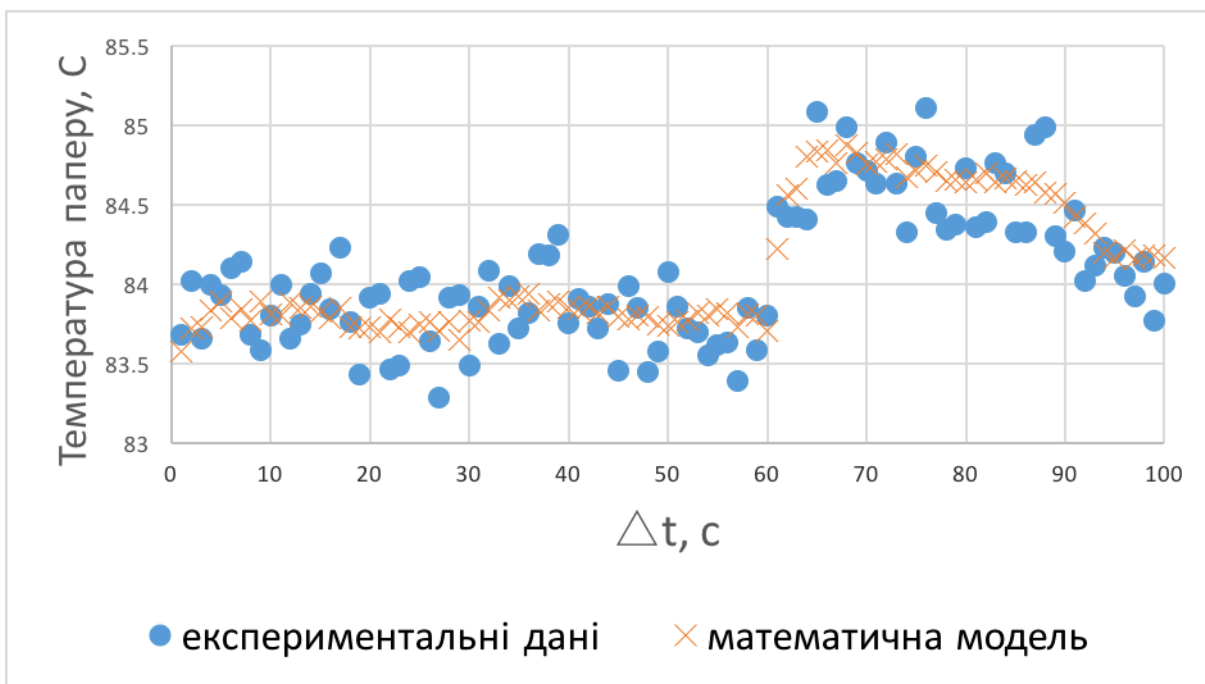


Рисунок 2.12 – Температура паперу на виході із 6-го сушильного циліндра

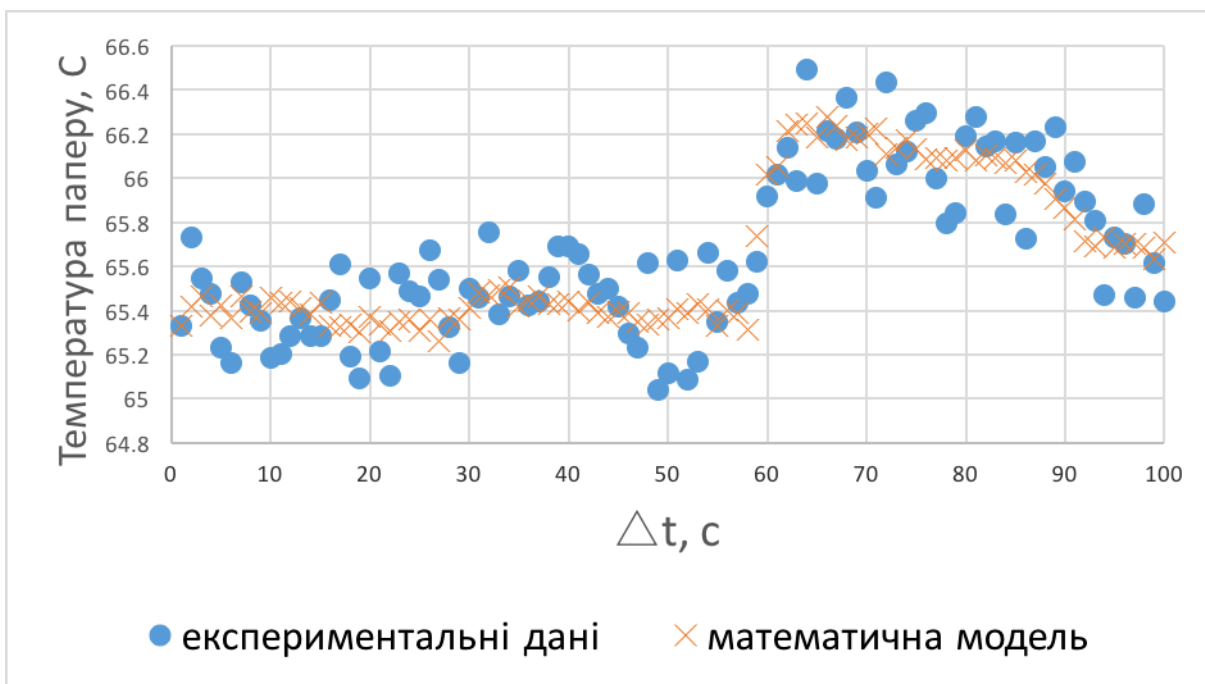


Рисунок 2.13 – Температура паперу на виході з 6-ї ділянки вільного руху

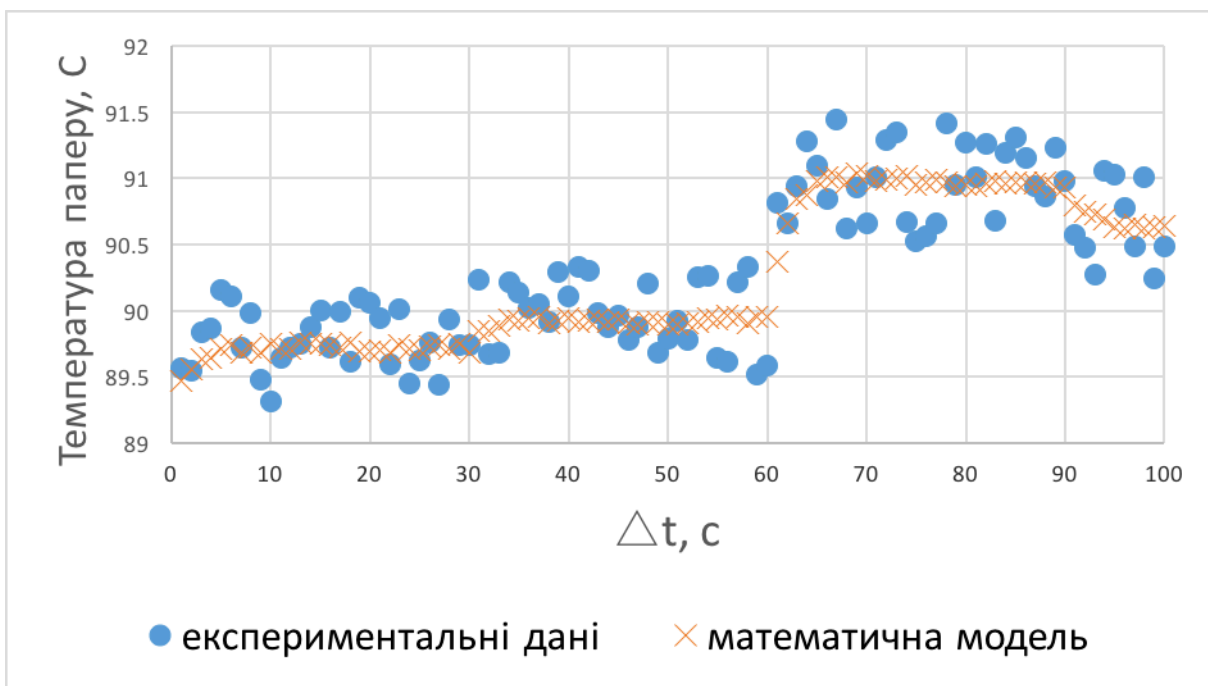


Рисунок 2.14 – Температура паперу на виході із 7-го сушильного циліндра

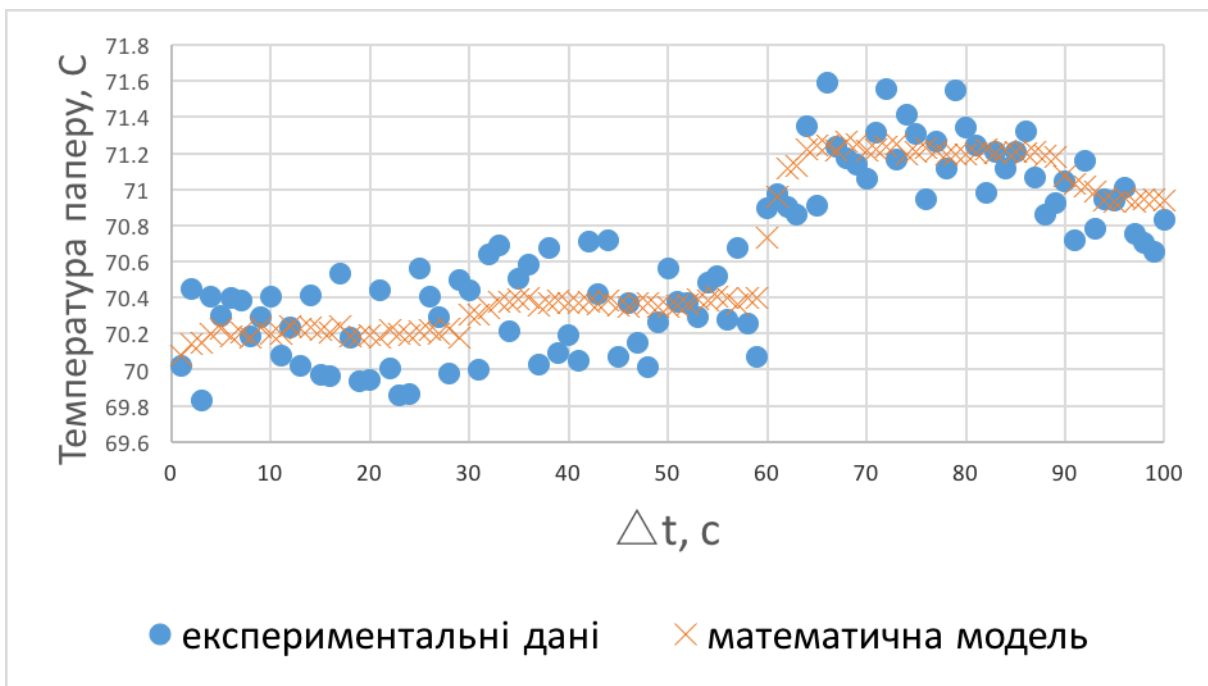


Рисунок 2.15 – Температура паперу на виході з 7-ї ділянки вільного руху

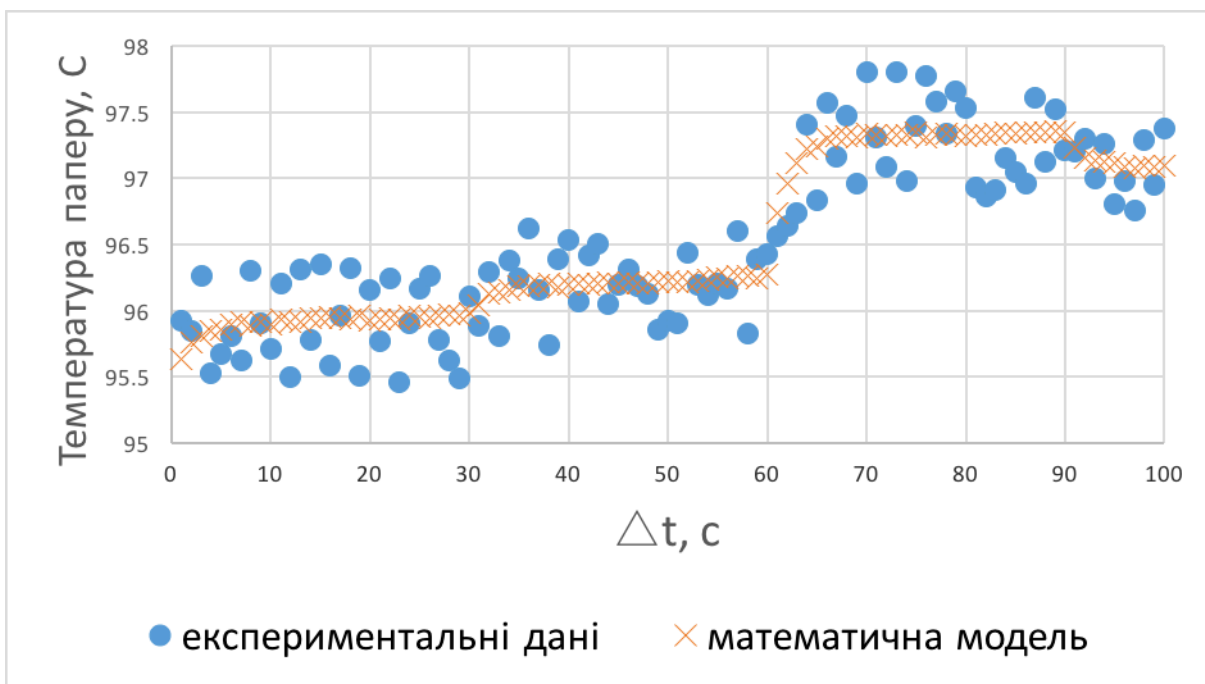


Рисунок 2.16 – Температура паперу на виході із 8-го сушильного циліндра

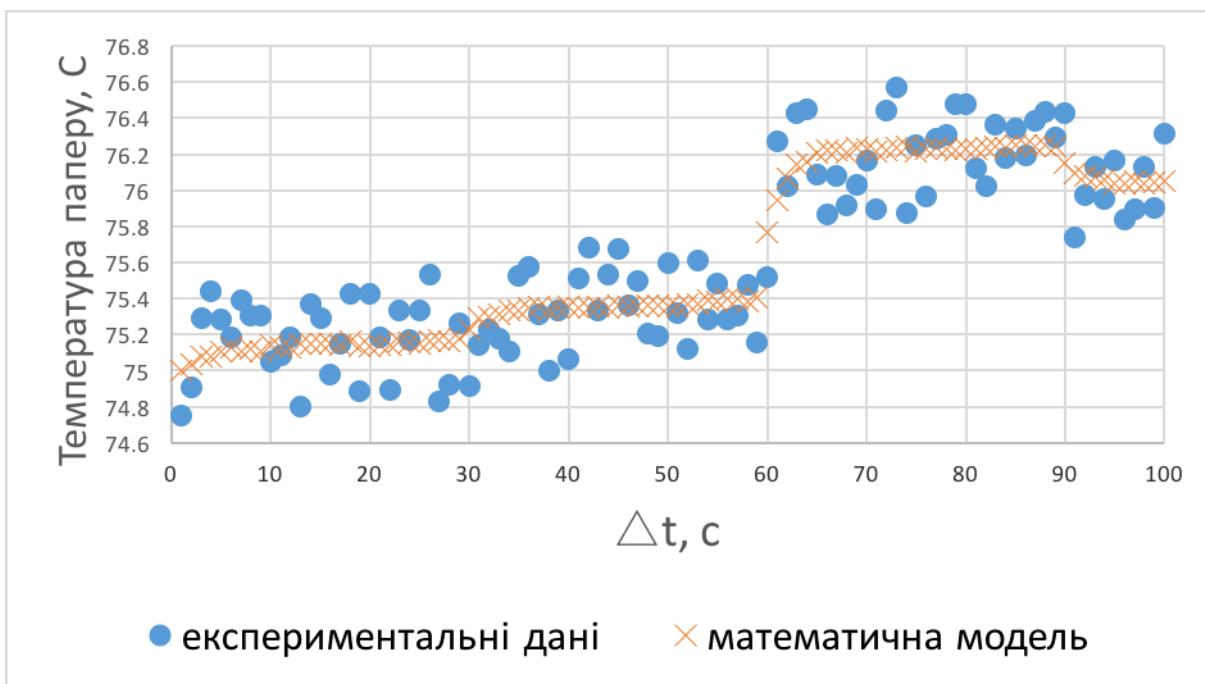


Рисунок 2.17 – Температура паперу на виході з 8-ї ділянки вільного руху

З використанням статистичних методів обробки даних [51] розраховано оцінки статистичних характеристик всіх точок вимірювання температури отриманих в ході проведення експерименту. Отримані результати наведено у таблиці 2.1:

Таблиця 2.1 Статистичні характеристики експериментальних даних

Місце вимірювання	Статистичні характеристики		
	Математичне сподівання	Дисперсія	Середнє квадратичне відхилення
1	2	3	4
1-й сушильний циліндр	40.14	0.21	0.46
1-ша ділянка вільного руху	34.58	0.21	0.46
2-й сушильний циліндр	47.67	0.14	0.38
2-га ділянка вільного руху	41.86	0.15	0.39
3-й сушильний циліндр	56.2	0.15	0.39
3-та ділянка вільного руху	50.7	0.15	0.39
4-й сушильний циліндр	65.57	0.17	0.42
4-та ділянка вільного руху	54.83	0.12	0.35
5-й сушильний циліндр	74.6	0.26	0.51
5-та ділянка вільного руху	62.8	0.19	0.43
6-й сушильний циліндр	84.08	0.18	0.47
6-та ділянка вільного руху	65.66	0.13	0.36
7-й сушильний циліндр	90.3	0.33	0.58
7-ма ділянка вільного руху	70.61	0.21	0.47
8-й сушильний циліндр	96.51	0.41	0.64
8-ма ділянка вільного руху	75.62	0.25	0.49

З використанням статистичних методів обробки даних [51] розраховано оцінки статистичних характеристик для всіх точок вимірювання температури, отриманих за математичною моделлю. Отримані результати наведено у табл. 2.2:

Таблиця 2.2 – Статистичні характеристики даних отриманих за моделлю

Місце вимірювання	Статистичні характеристики		
	Математичне сподівання	Дисперсія	Середнє квадратичне відхилення
1	2	3	4
1-й сушильний циліндр	40.14	0.18	0.42
1-ша ділянка вільного руху	34.41	0.18	0.42
2-й сушильний циліндр	47.68	0.14	0.38
2-га ділянка вільного руху	42.2	0.14	0.38
3-й сушильний циліндр	56.2	0.15	0.38
3-та ділянка вільного руху	50.68	0.14	0.38
4-й сушильний циліндр	65.61	0.15	0.38
4-та ділянка вільного руху	54.8	0.12	0.35
5-й сушильний циліндр	74.58	0.23	0.48
5-та ділянка вільного руху	62.8	0.17	0.41
6-й сушильний циліндр	84.1	0.17	0.41
6-та ділянка вільного руху	65.65	0.11	0.33
7-й сушильний циліндр	90.24	0.3	0.54
7-ма ділянка вільного руху	70.63	0.19	0.43
8-й сушильний циліндр	96.54	0.36	0.6
8-ма ділянка вільного руху	75.62	0.22	0.47

Використовуючи дані табл. 2.1 та 2.2, у табл. 2.3 наведено розрахункові та табличні значення критеріїв Стьюдента та Фішера, за якими проводилася перевірка математичної моделі на адекватність.

Таблиця 2.3– Розрахункові та табличні дані критеріїв Стьюдента та Фішера

Місце вимірювання	Критерій Стьюдента		Критерій Фішера	
	Розрах	Табличний	Розрах	Табличний
1	2	3	4	5
1-й сушильний циліндр	0.73	1.984	1.13	1.26
1-ша ділянка вільного руху	0.11		1.17	
2-й сушильний циліндр	0.45		1.02	
2-га ділянка вільного руху	0.3		1.07	
3-й сушильний циліндр	0.87		1.06	
3-та ділянка вільного руху	0.52		1.07	
4-й сушильний циліндр	0.06		1.19	
4-та ділянка вільного руху	0.07		1.03	
5-й сушильний циліндр	0.44		1.16	
5-та ділянка вільного руху	0.93		1.11	
6-й сушильний циліндр	0.19		1.1	
6-та ділянка вільного руху	0.62		1.17	
7-й сушильний циліндр	0.04		1.15	
7-ма ділянка вільного руху	0.36		1.17	
8-й сушильний циліндр	0.29		1.13	
8-ма ділянка вільного руху	0.9		1.14	

Порівнявши розрахункове значення критерію Стьюдента та Фішера для всіх точок масивів  $T_{ц}$  та  $T_{вр}$  з табличним, можна зробити висновок, що немає підстав відхиляти гіпотезу про адекватність математичної моделі прогрівання паперового полотна. Тому будемо вважати, що математична модель адекватно описує технологічний процес прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Обґрунтована необхідність створення математичної моделі прогрівання паперового полотна з урахуванням технологічних особливостей даного процесу.
2. Проаналізовано та визначено основні особливості та механізми переносу тепла і вологи під час сушіння паперового полотна та на етапі прогрівання зокрема.
3. Розроблено математичну модель тепло- та масопереносу для етапу прогрівання у відповідності до механізму тепломасопереносу під час перебування паперового полотна на сушильному циліндрі та ділянці вільного руху.
4. Проведено дослідження розробленої математичної моделі на адекватність реальному технологічному процесу прогрівання паперового полотна з використанням статистичних критеріїв Стьюдента та Фішера.

### РОЗДІЛ 3

## ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПРОГРІВАННЯ ПАПЕРОВОГО ПОЛОТНА

### 3.1 Вибір критерію оптимальності керування процесом прогрівання паперового полотна

Питанням, пов'язаним з оптимізацією роботи системи керування процесом прогрівання паперового полотна присвячена значна кількість досліджень [20,53 - 58].

Серед цих досліджень варто виділити роботу J. Akesson [20]. У ній розглядається постановка двох завдань.

Перше з них сформульовано для математичного моделювання процесу сушіння. Його суть полягає у мінімізації відхилення параметрів стану, розрахованих за моделлю, з експериментально отриманими даними виробництва. Для розв'язання даної задачі запропоновано критерій якості на основі методу найменших квадратів відхилення параметрів розрахованих за моделлю і отриманих із системи:

$$J = \gamma_{T_m} \sum_{i=1}^{N_{cul}} (T_{m,i}^m - T_{m,i}^s)^2 + \gamma_{T_p} \sum_{i=1}^{N_{cul}} (T_{p,i}^m - T_{p,i}^s)^2 \gamma_u (u_{out}^m - u_{out}^s)^2$$

де  $N_{cul}$  – кількість циліндрів;  $T_{m,i}^m$  – температура сушильного циліндра;  $T_{p,i}^m$  – температура паперу;  $\gamma_{T_p}$ ,  $\gamma_u$ ,  $\gamma_{T_m}$  – вагові коефіцієнти;  $m$  – позначення даних розрахованих за моделлю;  $s$  – позначення реальних даних;  $u_{out}^m$  – значення вологості, отримане за моделлю, %;  $u_{out}^s$  – реальне значення вологості, %.

Критерій якості  $J$  безрозмірна величина, це досягається шляхом домноження кожного доданка на нормуючий множник (ваговий коефіцієнт).

Другим завданням у даній роботі є стабілізація вологості паперового полотна. Для забезпечення вирішення такого завдання запропоновано метод опису стану

вологості полотна кусково-безперервними функціями для кожного сушильного циліндра. З метою запобігання неефективних керувань, які можуть порушити правильну роботу системи, величина похибки між керувальними впливами включена у критерій якості керування. Також введено суворі обмеження на величину керування. Критерій якості для цього завдання записано у наступному вигляді:

$$\min \int_0^T (u_{out}^{sp}(t) - u_{out}(t))^2 dt + \sum_{i=0}^{N-1} \gamma_p (\Delta p_i^{sp})^2,$$

де  $u_{out}^{sp}$  – реальне значення вологості, %;  $u_{out}$  – задане значення вологості;  $\Delta p_i^{sp}$  – значення тиску пари в трубопроводі, кПа;  $N$  – кількість досліджуваних інтервалів по 5 секунд.

В роботі [55] критерій керування формується як мінімізація функції вартості сушіння та має такий вигляд:

$$J(k) = \sum_{i=0}^{H_p-1} \left\| \begin{bmatrix} r_1(k+i) - \hat{y}(k+i|k) \\ r_2(k+i) - u_1(k+i) \end{bmatrix} \right\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \left\| \begin{bmatrix} \Delta u_1(k+i) \\ \Delta u_2(k+i) \end{bmatrix} \right\|_R^2,$$

де  $(k+i|k)$  – прогнозування на крок вперед;  $H_p$  горизонт прогнозування;  $H_u$  – горизонт керування,  $\Delta$  – оператор різниці ( $\Delta = 1 - z$ , де  $z$  – оператор зсуву в зворотному напрямку);  $Q, R$  – матриці вагових коефіцієнтів.

Кожен із запропонованих критеріїв має свої переваги, однак основним їх спільним недоліком є його використання для всього процесу сушіння без врахування специфіки кожного з етапів.

Як показують дослідження, видалення вологи в цей час майже не відбувається [26, 28], це пов'язано з низькою температурою паперового полотна. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що стратегія керування для забезпечення найбільш

низького співвідношення витрати пари та кількості вилученої води з полотна паперу не є ефективною для процесу прогрівання.

Критерій керування із задачею стабілізації вологості паперового полотна [20] за тих самих причин не рекомендується використовувати для даного етапу.

Виходячи з цього, постає наукове завдання формування нового критерію керування, саме для прогрівання паперового полотна, що буде відповідати завданням даного етапу.

Прогрівання паперового полотна грає важливу роль на етапі сушіння і використовується для доведення температури матеріалу до «робочого» значення, при якому починається ефективний процес видалення вологи. Весь етап може займати від 10 до 90 секунд, під час яких відбувається нагрівання паперового полотна від 20 до 100 °С (значення можуть варіюватись в залежності від виду продукції).

Значна зміна температури за такий короткий проміжок часу може призвести до незворотного погіршення фізико-механічних властивостей готової продукції. У зв'язку з цим виникає необхідність сформулювати завдання оптимального керування саме для ділянки прогрівання з урахуванням обмежень на параметри якості та керувальні впливи.

Оскільки основним завданням процесу прогрівання є доведення температури паперового полотна до заданого значення [59], необхідно мінімізувати відхилення реальної температури від температури завдання.

Весь процес сушіння складається з  $n$  інтервалів по  $s$  секунд (цей параметр залежить від технологічних особливостей машини і швидкості пропускання полотна), кожен з яких має ділянку контактного і конвективного сушіння [60]. Для кожного з них сформульовано своє завдання по температурі полотна і разом вони формують температурний графік [61].

Температурний графік індивідуальний для кожного виду паперу і відображає поступове нагрівання полотна, що необхідно для підтримки заданої внутрішньої структури. При стрибкоподібній зміні температури відбуваються безповоротні

процеси руйнування внутрішньої структури та погіршуються якісні показники готової продукції.

Для керування процесом нагрівання сушильних циліндрів, які згодом нагрівають паперове полотно, застосовують стратегію зміни витрати пари в трубопроводах до сушильних циліндрів [18]. Як показали дослідження [18], зміна цього параметра найбільшою мірою впливає на температуру циліндрів, а отже і паперу.

Завдання оптимального керування процесом прогрівання паперового полотна формулюється таким чином: необхідно підібрати такі керувальні дії (витрата пари), які забезпечують дотримання температурного графіка прогріву полотна з мінімальним відхиленням.

Завдання формулюється за припущень, що витрата пари, яка надходить у сушильний циліндр, дорівнює витраті конденсату, що його покидає. Другим припущенням є те, що пара, яка надходить у сушильний циліндр, заповнює рівномірно весь його внутрішній простір.

Для такого завдання критерій оптимального керування приймає наступний вигляд:

$$I(T_i^{zad}) = \sum_{i=0}^n (T_i^{real} - T_i^{zad})^2 \rightarrow \min, \quad (3.1)$$

де  $T_i^{real}$  – реальна температура паперу в кінці  $i$ -го інтервалу, °C;  $T_i^{zad}$  – завдання по температурі паперу в кінці  $i$ -го інтервалу, °C. Кількість інтервалів залежить від виду паперу, який виготовляється та виду ПРМ (може варіюватися від 4 до 15) [28].

При обмеженнях:

$$|T_i^{real} - T_i^{zad}| \leq e, \quad (3.2)$$

де  $e$  – допустиме температурне відхилення (залежить від типу паперу), °C.

$$F_{min}^c \leq F_i^c \leq F_{max}^c \quad (3.3)$$

де  $F_i^c$  – витрата пари у трубопроводі до сушильного циліндра на  $i$ -му інтервалі, кг/год;  $F_{min}^c$ ,  $F_{max}^c$  – гранично допустимі значення витрати пари у трубопроводі до сушильного циліндра, кг/год.

Запропонований критерій керування разом з обмеженнями має наступні переваги над аналогами:

- врахована специфіка процесу прогрівання паперового полотна;
- значення критерію є кількісна оцінка величини відхилення температури від оптимального значення;
- враховано величину максимально допустимого відхилення температури паперового полотна на кожному з інтервалів;
- сформовано технологічні обмеження на величину керувального впливу.

### 3.2 Обмеження на параметри якості паперового полотна

У процесі сушіння паперове полотно нагрівається до досить високих температур (100 і більше °С), що призводить, як згадувалося вище, до зміни його внутрішньої структури і тягне за собою зміну якісних показників. Їх граничні значення нормуються стандартами для кожного виду паперу. Для офсетного паперу, наприклад, значення якісних параметрів має відповідати вимогам ГОСТу [62] (дані наведено для вищого сорту):

1. Маса паперу площею 1 м<sup>2</sup>, г (65 ± 2).
2. Щільність, г / см<sup>2</sup> (0,75–0,85).
3. Розривна довжина, м (3700).
4. Міцність на злом під час багаторазових перегинів, кількість подвійних перегинів (не менше 7).
5. Ступінь проклеювання, мм (1,2–1,8).

6. Білість кожного боку, % (85–88).
7. Гладкість, з (30–80 після сушильної частини).
8. Масова частка золи, % (10–14).
9. Лінійна деформація, % (+2,2).
10. Засміченість, число смітинок на 1 м<sup>2</sup> (80).
11. Вологість, % (5,5 ± 1).
12. Стійкість поверхні до вищипування, м / с (2,2).

Не всі із зазначених вище параметрів якості залежать від режиму сушіння [28], тому було сформульовано обмеження тільки для тих з них, що мають таку залежність.

Розривна довжина:

$$Rd(i) \geq Rd_{gost(s)} \quad (3.4)$$

де  $Rd_{gost(s)}$  – значення параметра «розривна довжина» наведено в стандарті (для різних видів паперу це значення різне);  $s$  – позначення сорту готової продукції (Вищий, Перший, А, Б).

У формулі  $Rd(i) \geq Rd_{gost(s)}$  і надалі під  $i$  необхідно розуміти інтервал з діапазону 1...n. Тоді,  $Rd(i)$  – значення параметра розривної довжини паперового полотна в кінці  $i$ -го інтервалу.

Міцність на злом під час багаторазових перегинів (кількість подвійних перегинів):

$$Dd(i) \geq Dd_{gost(s)} \quad (3.5)$$

де  $Dd_{gost(s)}$  – кількість подвійних перегинів наведено у стандарті (для різних видів паперу це значення різне).

Ступінь проклеювання:

$$Sp(i) \geq Sp_{gost(s)} \quad (3.6)$$

де  $Sp_{gost(s)}$  – значення параметра «ступінь проклеювання», наведено у стандарті (для різних видів паперу це значення різне). Даний параметр єдиний для всіх сортів паперу (який розглядається як приклад) і тому коефіцієнт  $s$  відсутній.

Маса паперу:

$$M_{gost(s)}^{min} \leq M(i) \leq M_{gost(s)}^{max} \quad (3.7)$$

де  $M_{gost(s)}^{min}$ ,  $M_{gost(s)}^{max}$  – мінімальне і максимальне допустиме значення маси 1 м<sup>2</sup> наведено в стандарті (для різних видів паперу це значення різне).

На значення вологості в процесі прогрівання не накладається обмеження у зв'язку з незначною кількістю води, що видаляється з матеріалу. Дана особливість обумовлена низькою температурою паперу на даному періоді сушіння [63].

Оскільки більшість експериментальних даних [28, 64 – 67] встановлюють залежність між якісними параметрами і температурою циліндра, виведемо функціональні залежності спочатку у вигляді:

$$\text{параметр якості} = f(\text{температура сушильного циліндра}).$$

Так і залежність можна побудувати на підставі експериментальних даних з робіт [2, 26, 28]. Для параметра розривна довжина:

$$Rd = r1 * T + r0,$$

де  $Rd$  – значення параметра розривна довжина, м;  $T$  – температура сушильного циліндра, °C;  $r1$ ,  $r0$  – вагові коефіцієнти, значення яких залежать від технологічних параметрів процесу і особливостей паперового полотна.

Для міцності на злом під час багаторазових перегинів формується більш складна залежність. Оскільки значення даного параметра є дискретною величиною, для опису залежності необхідно застосувати кусково-задану функцію:

$$Dp = \begin{cases} Dp_1, T_1 \leq T \leq T_1 \\ Dp_2, T_2 < T \leq T_3 \\ \dots \\ Dp_n, T_{n-1} < T \leq T_n \end{cases}, \quad (3.8)$$

де  $Dp_1 \dots Dp_n$  – кількість подвійних перегинів для заданого діапазону температур, шт.;  $T \dots T_{n-1}$  – значення температури сушильних циліндрів, °С. Всі описані вище величини залежать від виду паперу, що виготовляється.

Для параметра ступінь проклейки:

$$Sp = s_2 * T^2 + s_1 * T + s_0$$

де  $Sp$  – ступінь проклеювання, мм;  $s_2, s_1, s_0$  – вагові коефіцієнти, значення яких залежить від технологічних параметрів процесу і особливостей паперового полотна.

Зв'язок між температурою паперу на виході із сушильного циліндра і його температурою можна представити у вигляді залежності [26]:

$$t_{62} = t_{ц} - \frac{t_{ц} - t_{61}}{e^{\frac{\alpha_{КТ} \tau_{ц}}{(c_{сп} + c_{в} + u_0) P_{сп}}}}$$

У дослідженнях, проведених авторами [28, 34, 36], пропонується накладати обмеження на температуру сушильних циліндрів. Дане обмеження матиме такий вигляд:

$$T_{min}^c \leq T_i^c \leq T_{max}^c,$$

де  $T_{min}^c$  – мінімальне значення температури, при якому параметри якості паперу відповідають встановленим у стандарті значенням, °С;  $T_{max}^c$  – максимальне значення температури, при якому параметри якості паперу відповідають встановленим у стандарті значенням, °С.

$T_{min}^c$  и  $T_{max}^c$  – вибираються в залежності від виду паперу, який виробляється.

$T_i^c$  – температура  $i$ -го сушильного циліндра ( $i = 1, 2..n$ , де  $n$  кількість циліндрів в процесі прогріву), °C.

Отже, задача оптимального керування процесом прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини формулюється таким чином: необхідно мінімізувати критерій оптимального керування при дотриманні системи обмежень на:

- відхилення реальної температури паперу від заданої;
- керувальні дії (витрата пари);
- температуру сушильних циліндрів;
- параметри якості готової продукції.

### 3.3 Оптимальний температурний графік прогрівання паперового полотна

Для розрахунку величини запропонованого критерію оптимального керування перш за все необхідно володіти інформацією про завдання по температурі на виході з кожного сушильного циліндра і ділянки вільного руху. Більш того, в умовах надзвичайно швидкого протікання процесу і зміни великої кількості технологічних параметрів постає задача отримання динамічно змінюваного оптимального температурного графіка прогрівання паперового полотна, що буде враховувати особливості протікання технологічного процесу.

В той же час, реалізація поставленої задачі має враховувати необхідність якнайшвидшого доведення температури паперу до заданого значення (закінчення процесу прогрівання). Однак, оскільки папір відноситься до капілярно-пористих колоїдних тіл, тому при різкому підвищенні температури відбуваються незворотні процеси руйнування внутрішньої структури, що веде до значного погіршення якісних показників. Це також призводить до забруднення поверхні сушильних циліндрів і різко знижує ККД сушіння.

Отже, необхідно розробити алгоритм розрахунку оптимального температурного графіка прогрівання, який забезпечить найбільш швидке нагрівання паперу до заданого значення при дотриманні обмежень на якісні показники кінцевого продукту і враховуватиме оперативну інформацію про зміну технологічних параметрів протікання процесу.

### 3.3.1 Обмеження на зміну температури паперового полотна

Відомо [1, 2, 3, 5], що якість готового паперу визначається рядом показників, які регламентуються стандартом [62, 68 - 71]. Вихід хоча б одного з них за допустимі межі відносить папір до більш низького класу та відповідно знижує вартість. Внаслідок цього як обмеження для температури нагрівання паперового полотна необхідно вибирати найбільш чутливі до змін температури показники. Вони будуть формувати допустимі межі зміни температури паперу на кожному циліндрі. На жаль, не можна вибрати загальні для всіх видів паперу показники якості.

Спочатку важливо встановити межі параметрів якості, які відповідають стандарту для конкретного виду паперу і визначити відповідні їм значення температури, допустимі величини її зміни:

$$T_{\text{гр}}(P_2) \leq T_{p,1} \leq T_{\text{гр}}(P_1), \quad (3.10)$$

де  $T_{\text{гр}}(P_1)$  і  $T_{\text{гр}}(P_2)$  – граничні значення температури, які відповідають значенню показника якості, зазначеному у стандарті, ° С. При цьому завжди виконується умова:

$$T_{\text{гр}}(P_2) \leq T_{\text{гр}}(P_1),$$

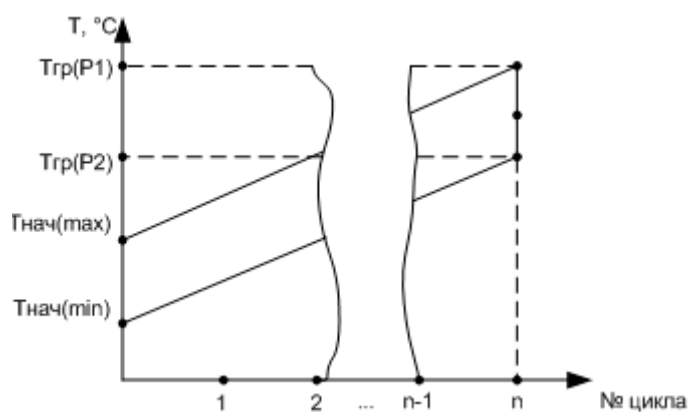
Обмеження (3.8) являє собою обмеження на кінцеве значення температури процесу прогрівання.

Проміжне значення допустимої зміни температури паперу на конкретному сушильному циліндрі є функцією від поточного значення температури та обмеження на температуру, що накладаються параметрами якості:

$$\Delta T_n = f(\Delta T_{\text{доп}, n}, T_{n0}), \quad (3.9)$$

де  $\Delta T_n$  – величина зміни температури паперу на n-м циліндрі;  $\Delta T_{\text{доп}, n}$  – допустима зміна значення температури відповідно до параметрів якості, °С;  $T_{n0}$  – температура паперу на вході на n-й циліндр, °С.

У графічному вигляді зазначено вище умови (3.9) і обмеження (3.8) мають такий вигляд:



$T_{гр}(P1)$  – максимального допустиме значення температури паперового полотна в кінці етапу прогрівання, обмежене найбільш чутливим параметром якості, °С;

$T_{гр}(P2)$  – мінімально допустиме значення температури паперового полотна в кінці етапу прогрівання, обмежене найбільш чутливим параметром якості, °С.

Рисунок 3.1 – Область допустимих значень температури полотна при прогріванні паперового полотна

З урахуванням схеми контрольних точок контакту паперового полотна із сушильним циліндром і ділянок вільного ходу, що буда сформована у розділі 2 (рис. 2.1), отримуємо загальний вид графіка прогрівання паперового полотна:

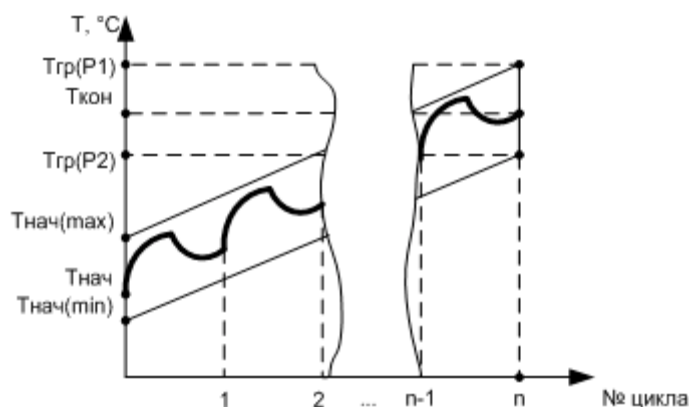


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд температурного графіка прогрівання паперового полотна з обмеженнями на температуру паперу

Як видно з аналізу рис. 3.1, 3.2, у кожному циклі є 2 критичні точки, які відповідають значенням температури на виході із сушильного циліндра і в кінці ділянки вільного руху. Отже, для побудови температурного графіка сушіння необхідно розраховувати два набори значень температури, а саме: у момент виходу паперу із сушильного циліндра (перша критична точка) і відповідне йому значення в кінці ділянки вільного руху (друга критична точка).

Кількість циклів ( $n$ ), а отже і сушильних циліндрів, визначається видом паперу, який виготовляється та особливостями ПРМ (вибирається така кількість, що забезпечує досягнення папером температури мокрого термометра). Як видно з рис. 3.2, їх кількість на етапі прогрівання (ліві частини ліній до встановлення постійного значення температури) може коливатися від 5 до 15 циклів [28].

#### 3.4 Алгоритм розрахунку оптимального температурного графіка прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини

Загальний алгоритм розрахунку оптимального температурного графіка прогрівання паперового полотна, як показали дослідження [26, 28], доцільно представити у вигляді покрокового алгоритму у реальному часі. Це дає можливість

його подальшої реалізації у вигляді спеціального математичного та програмного забезпечення (СМПЗ) для моделювання загального процесу сушіння і створення системи автоматичного керування сушильною частиною ПРМ.

Алгоритм можна розділити на 2 частини:

- розрахунок температури паперового полотна на сушильному циліндрі;
- розрахунок температури паперового полотна на ділянці вільного руху.

Для кожного з них існує своє завдання щодо кінцевої температури ( $T_3$  і  $T_{3(сх)}$ ) для кожного сушильно циліндра і загальне завдання для всього процесу прогрівання паперового полотна.

Розрахунок температури паперового полотна починається з моменту надходження паперу на перший сушильний циліндр. На цей момент доступна інформація з наступних датчиків:

- температури паперового полотна на виході з пресової частини;
- вологості паперового полотна на виході з пресової частини;
- температури повітря в сушильній частині папероробної машини;
- вологості повітря в сушильній частині папероробної машини;

А також про геометричні розміри сушильної сушильної частини (параметри сушильних циліндрів, ділянок вільного руху), дані про вид паперу, що виробляється, критичні значення його показників якості, що нормуються відповідним стандартом (ГОСТ, ДСТУ).

Результатом роботи алгоритму є масив температур паперового полотна в кінці кожного сушильного циліндру і ділянки вільного руху, що відповідає оптимальному температурному графіку прогрівання паперового полотна.

Структурна схема алгоритму розрахунку оптимального температурного графіку прогріву паперового полотна показана на рис.3.3.

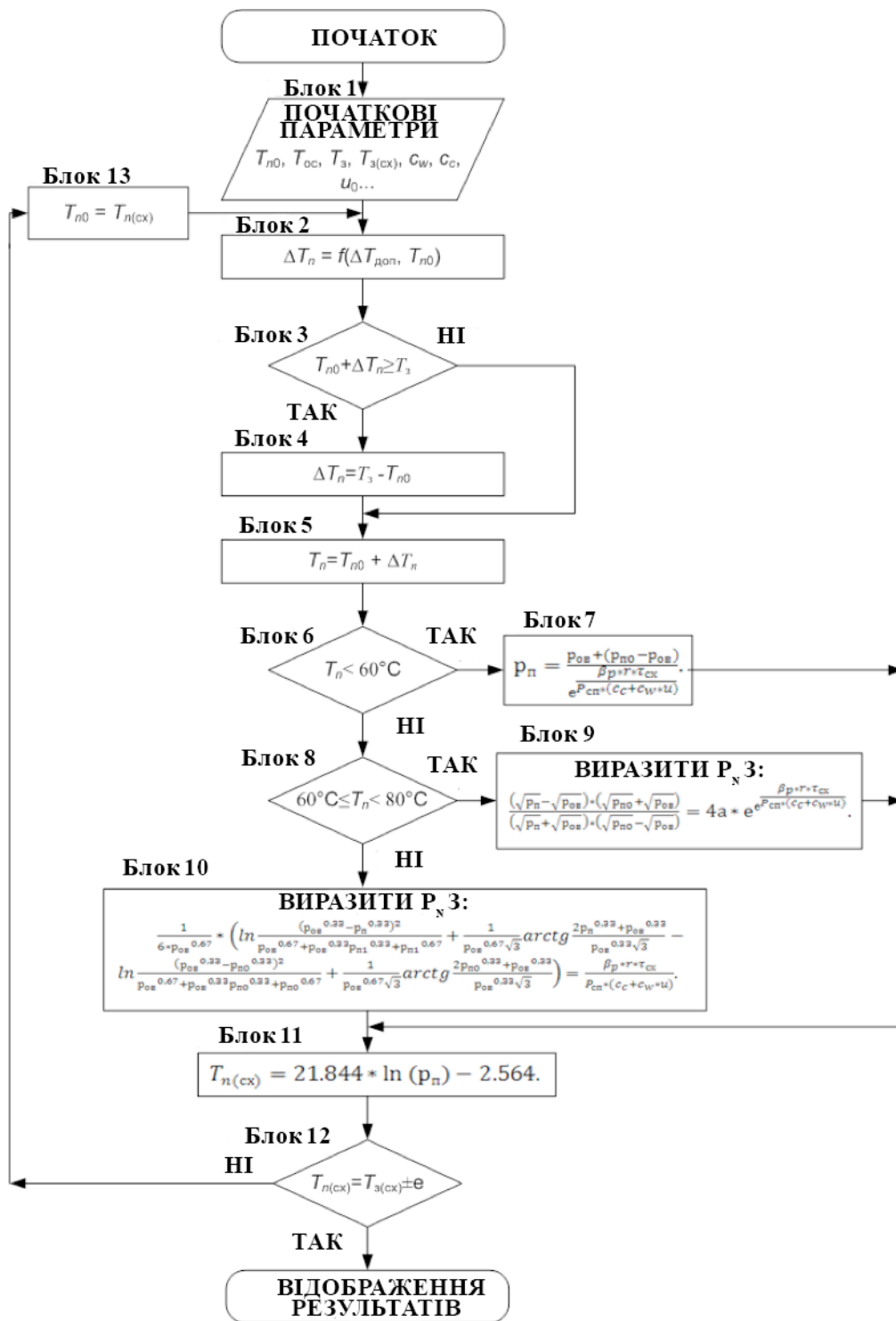


Рисунок 3.3 – Структура схема алгоритму розрахунку оптимального температурного графіка прогрівання паперового полотна

Блок 1. Для початку роботи алгоритму необхідно ввести початкові параметри процесу, температуру і вологість паперу при вході на сушильний циліндр, параметри сушильного циліндра і навколишнього середовища на ділянці вільного руху.

Блок 2. Розрахунок величини нагрівання паперу на сушильному циліндрі (залежить від початкової температури  $T_{n0}$  і допустимої величини зміни температури  $\Delta T_{\text{доп}}$ , обмеження за якістю) (3.9).

Блок 3. Якщо температура на виході з поточного сушильного циліндра перевищує температуру завдання  $(T_{n0} + \Delta T_{\text{доп}}) \geq T_3$ , то необхідно зменшити величину  $\Delta T_{\text{доп}}$ , інакше це призведе до перегрівання полотна і зниження якісних показників, переходимо до блоку 4. Якщо  $(T_{n0} + \Delta T_{\text{доп}}) < T_3$ , то переходимо до розрахунку температури на виході із сушильного циліндра, блок 5.

Блок 4. Розраховуємо допустиму зміну температури паперового полотна на поточному сушильному циліндрі (без перегріву):

$$\Delta T_n = T_3 - T_{n0}.$$

і переходимо на блок 5.

Блок 5. На основі температури на початку сушильного циліндра  $T_{n0}$  і величини нагрівання  $\Delta T_n$  розраховуємо температуру в кінці поточного циліндра:

$$T_n = T_{n0} + \Delta T_n$$

Після виходу із сушильного циліндра папір проходить по ділянці вільного ходу. Температура полотна на виході розраховується за формулою:

$$T_{n(\text{сх})} = 21,844 \ln(p_n) - 2,564,$$

де  $p_n$  – парціальний тиск на поверхні матеріалу, Па. Дана величина залежить від температури паперу на початку ділянки вільного руху на виході із сушильного циліндра. Залежно від величини температури розрахунок  $p_n$  необхідно проводити за різними формулами.

Блок 6. Якщо  $T_n < 60$  °С, тоді для розрахунку  $p_n$  переходимо на блок 7. Інакше переходимо на блок 8.

Блок 7. Розрахунок  $p_{\Pi}$  проводиться за формулою:

$$p_{\Pi} = \frac{p_{\text{ОВ}} + (p_{\Pi 0} - p_{\text{ОВ}})}{\frac{\beta_p r \tau_{\text{СХ}}}{e^{P_{\text{СП}}(c_c + c_w u)}}},$$

де  $p_n, p_{\text{ОВ}}$  – парціальні тиски на поверхні матеріалу і в навколишньому середовищі, Па;  $\beta_p$  – коефіцієнт масообміну, віднесений до різниці парціальних тисків, кг / (м<sup>2</sup> \* год \* Па);  $c_c$  – теплоємність сухого матеріалу, кДж / (кг ° С);  $c_w$  – теплоємність води, кДж / (кг ° С);  $\tau$  – час проходження паперу по ділянці вільного ходу, с;  $P_{\text{СП}}$  – маса квадратного метра сухого полотна, г / м<sup>2</sup>;  $u$  – вологовміст паперового полотна, кг/кг. Після чого переходимо на блок 11 для розрахунку кінцевої температури.

Блок 8. Якщо  $60 \text{ °С} \leq T_n < 80 \text{ °С}$  – переходимо на блок 9. Якщо температура перевищує  $80 \text{ °С}$ , переходимо на блок 10.

Блок 9. Розрахунок  $p_{\Pi}$  проводиться за формулою:

$$\frac{(\sqrt{p_{\Pi}} - \sqrt{p_{\text{ОВ}}})(\sqrt{p_{\Pi 0}} + \sqrt{p_{\text{ОВ}}})}{(\sqrt{p_{\Pi}} + \sqrt{p_{\text{ОВ}}})(\sqrt{p_{\Pi 0}} - \sqrt{p_{\text{ОВ}}})} = 4ae^{\frac{\beta_p r \tau_{\text{СХ}}}{P_{\text{СП}}(c_c + c_w u)}}.$$

Після чого переходимо на блок 11.

Блок 10. За температури паперу на виході із сушильного циліндра більше  $80 \text{ °С}$ , розрахунок  $p_{\Pi}$  необхідно проводити методом ітерацій з рівняння 6:

$$\frac{1}{6p_{\text{ОВ}}^{0,67}} \left( \ln \frac{(p_{\text{ОВ}}^{0,33} - p_{\Pi}^{0,33})^2}{p_{\text{ОВ}}^{0,67} + p_{\text{ОВ}}^{0,33} p_{\Pi 1}^{0,33} + p_{\Pi 1}^{0,67}} + \frac{1}{p_{\text{ОВ}}^{0,67} \sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2p_{\Pi}^{0,33} + p_{\text{ОВ}}^{0,33}}{p_{\text{ОВ}}^{0,33} \sqrt{3}} - \ln \frac{(p_{\text{ОВ}}^{0,33} - p_{\Pi 0}^{0,33})^2}{p_{\text{ОВ}}^{0,67} + p_{\text{ОВ}}^{0,33} p_{\Pi 0}^{0,33} + p_{\Pi 0}^{0,67}} + \frac{1}{p_{\text{ОВ}}^{0,67} \sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2p_{\Pi 0}^{0,33} + p_{\text{ОВ}}^{0,33}}{p_{\text{ОВ}}^{0,33} \sqrt{3}} \right) = \frac{\beta_p r \tau_{\text{СХ}}}{P_{\text{СП}}(c_c + c_w u)}.$$

Блок 11. За отриманого значення  $p_n$  (в залежності від початкової температури) розраховуємо температуру в кінці ділянки вільного ходу.

Блок 12. Якщо:

$$|T_{n(cx)} - T_{z(cx)}| \leq e,$$

де  $e$  – максимально допустиме відхилення температури в кінці ділянки вільного руху, тоді процес прогрівання закінчений і система видає температурний графік (оптимальні значення температури паперу на кожному сушильному циліндрі і ділянці вільного руху). Якщо рівність не виконується – процес нагрівання необхідно продовжити на наступному сушильному циліндрі.

Блок 13. Температурі на вході на наступний сушильний циліндр присвоюється температура в кінці ділянки вільного руху і алгоритм починається з початку.

### 3.5 Програмна реалізація алгоритму розрахунку оптимального температурного графіка прогрівання

Як було визначено з наведених вище експериментальних даних, до розрахунку оптимального температурного графіка прогрівання паперового полотна необхідно у режимі реального часу вносити зміни у параметри розрахунку відповідно до зміни технологічного процесу.

Для розв'язання цієї задачі розроблено комп'ютерну систему розрахунку оптимального температурного графіка прогрівання паперового полотна з інтеграцією в неї системи обробки інформації від датчиків, встановлених у сушильній частині та її передачу у програму розрахунку.

Програма для розрахунку оптимального температурного графіка прогрівання паперового полотна була розроблена з наступним спектром можливостей:

1. Взаємодія із зовнішніми об'єктами (отримання даних з приладів,

підключених до комп'ютера через комунікаційні порти).

2. Зручний об'єктно-орієнтовний інтерфейс.
3. Висока швидкодія у ході розрахунку динамічних систем.

Програмний продукт з такими можливостями дозволяє розраховувати оптимальний температурний графік прогрівання паперового полотна на основі даних про зміну вхідних параметрів, отриманих з датчиків, розташованих в об'єкті керування у реальному часі. В основу роботи програми покладено алгоритм розрахунку, що запропоновано вище (рис. 3.3) з внесенням деяких додаткових модулів:

1. Розрахунок тиску в оточуючому середовищі.
2. Розрахунок тиску над поверхнею паперового полотна.
3. Розрахунок тривалості перебування паперу на ділянці вільного руху.
4. Розрахунок кроку нагрівання паперу на сушильному циліндрі з врахуванням зниження температури на попередній ділянці вільного руху.
5. Розрахунок коефіцієнта масообміну як функції від парціального тиску над поверхнею паперового полотна і в оточуючому середовищі.
6. Деталізація даних про вхідні параметри процесу.

Робочий інтерфейс розробленого програмного продукту складається з наступних блоків:

1. Блок вхідних параметрів паперу.
2. Блок параметрів сушильної частини ПРМ.
3. Блок параметрів оточуючого повітря.
4. Блок параметрів тепло- і масообміну.
5. Блок виводу результатів роботи програми.

Кожен з блоків являє свою окреме програмне рішення і за необхідності може бути використаний окремо від інших. Це розширює спектр використання даного програмного продукту і надає можливість його застосування при роботі з іншими технологічними об'єктами.

### 3.5.1 Блок вхідних параметрів паперу

Параметри паперу		Завдання (температура на виході з останнього сушильного циліндра), °C	
Температура паперу на початку сушіння, °C	26,87	102	Вологість паперу на початку сушіння, кг/кг
Крок нагрівання на першому сушильному циліндрі, °C	9,391	60	Маса 1 м <sup>2</sup> сухого полотна, г/м <sup>2</sup>

Рисунок 3.4 – Вхідні параметри паперу

Параметри “Температура паперу на початку сушіння, °C”, “Вологість паперу на початку сушіння, кг/кг” та “Маса 1 м<sup>2</sup> сухого полотна, г/м<sup>2</sup>” надходять з датчиків температури, вологості та маси встановлених на вході в сушильну частину ПРМ. “Завдання (температура на виході з останнього сушильного циліндра), °C” задається оператором у відповідності до виду паперу, що виробляється і зазвичай незмінна. “Крок нагрівання на першому сушильному циліндрі, °C” розраховується у відповідності до особливостей сушіння конкретного виду паперу.

### 3.5.2 Блок параметрів сушильної частини ПРМ

Значення “Кількість циліндрів”, “Радіус сушильного циліндра, м”, “Горизонтальна відстань між циліндрами, м”, “Вертикальна відстань між циліндрами, м” та “Швидкість ПРМ, м/с” задаються технологом у відповідності до виду ПРМ і типу паперу, що виробляється. “Довжина ділянки вільного руху, м” та “Час перебування полотна на ділянці вільного руху, с” розраховуються автоматично за даними про параметри сушильної частини.

Параметри сушильної частини ПРМ		
Кількість циліндрів, шт	Радіус сушильного циліндра, м	Горизонтальна відстань між циліндрами, м
8	1,5	0,3
Швидкість ПРМ, м/с	Вертикальна відстань між циліндрами, м	Довжина ділянки вільного руху, м
8	2,5	2,8
Час перебування полотна на ділянці вільного руху, с		
0,36		

Рисунок 3.5 – Параметри сушильної частини ПРМ

### 3.5.3 Блок параметрів оточуючого повітря

Параметри оточуючого середовища	
Температура оточуючого середовища, °С	Парціальний тиск пари в оточуючому повітрі, Па
20	2333

Рисунок 3.6 – Параметри оточуючого повітря

“Температура оточуючого середовища, °С” отримується з датчика температури встановленого над сушильними циліндрами. “Парціальний тиск пари в оточуючому середовищі, Па” розраховується у відповідності до температури за методикою, що наведена у розділі 2 (підрозділ 2.2.6).

### 3.5.4 Блок параметрів тепло - та масообміну

**Величини для розрахунків**

Коефіцієнт масообміну <input style="width: 100%;" type="text" value="0,1"/>	Теплота пароутворення, кДж/кг <input style="width: 100%;" type="text" value="2256"/>
Теплоємність сухого полотна, кДж/(кг*К) <input style="width: 100%;" type="text" value="1,43"/>	Теплоємність води, кДж/(кг*К) <input style="width: 100%;" type="text" value="4,2"/>

Рисунок 3.7 – Параметри тепло- та масообміну

“Теплота пароутворення, кДж/кг”, “Теплоємність сухого полотна, кДж/(кг\*К)”, “Теплоємність води, кДж/(кг\*К)” задаються перед початком роботи системи і є незмінними у часі. “Коефіцієнт масообміну” розраховується на основі даних про парціальний тиск на поверхні паперового полотна і в оточуючому середовищі.

### 3.5.5 Блок виводу результатів роботи програми

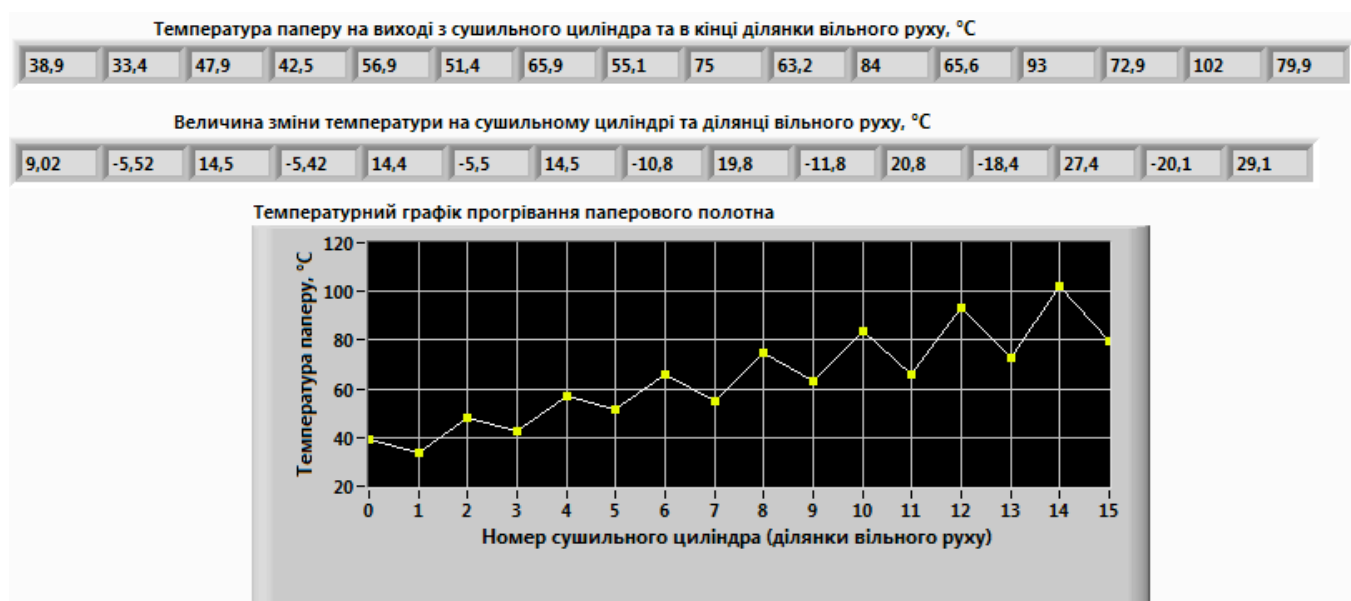


Рисунок 3.8 – Результати роботи програми

Вивід результатів роботи програми наведено у вигляді декількох елементів:

1. Масив «Температура паперу на виході із сушильного циліндра та в кінці ділянки вільного руху» (непарні елементи (1,3,5...n) — температура на виході з n-го суцільного циліндра, парні елементи (2, 4, 6... m) — температура в кінці m-ї ділянки вільного руху).

2. Масив «Величина зміни температури на сушильному циліндрі та ділянці вільного руху» (непарні елементи (1,3,5...n) — величина збільшення температури паперу на n-му сушильному циліндрі, парні елементи (2, 4, 6... m) — величина зменшення температури на m-й ділянці вільного руху).

3. Температурний графік нагрівання паперового полотна. Під час побудови графіка не враховувалась динаміка зміни температури за довжиною сушильного циліндра і ділянки вільного руху.

### 3.5.6 Особливості роботи програми

Повний вигляд робочого інтерфейсу програми показано на рис. 3.9.

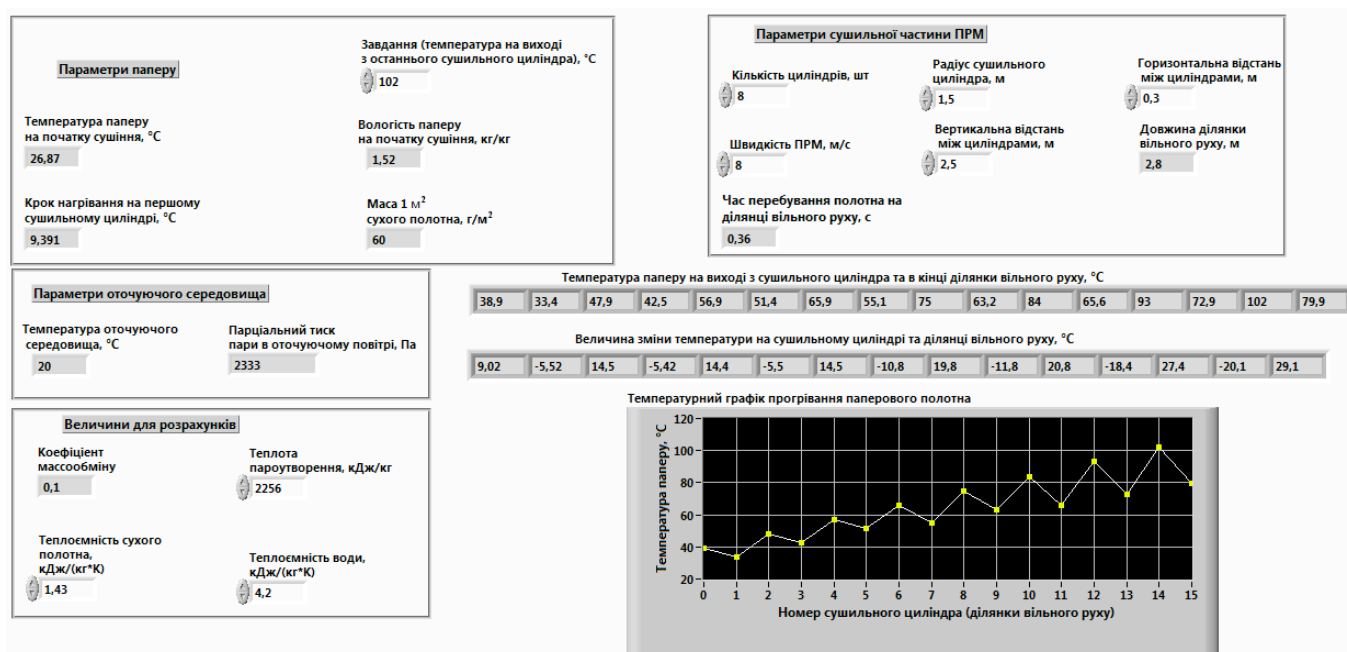


Рисунок 3.9 – Робочий інтерфейс програми

Головними перевагами отриманого рішення є:

1. Можливість під'єднання датчиків із сушильної частини ПРМ для отримання поточного значення параметрів вхідних величин, а як результат — оперативне корегування графіка нагрівання паперового полотна.
2. Можливість гнучкого налаштування роботи програми у відповідності до параметрів сушильної частини та виду паперу, що виробляється.
3. Можливість обробки та експорту вихідних даних в інше програмне забезпечення для подальшого зберігання та використання.

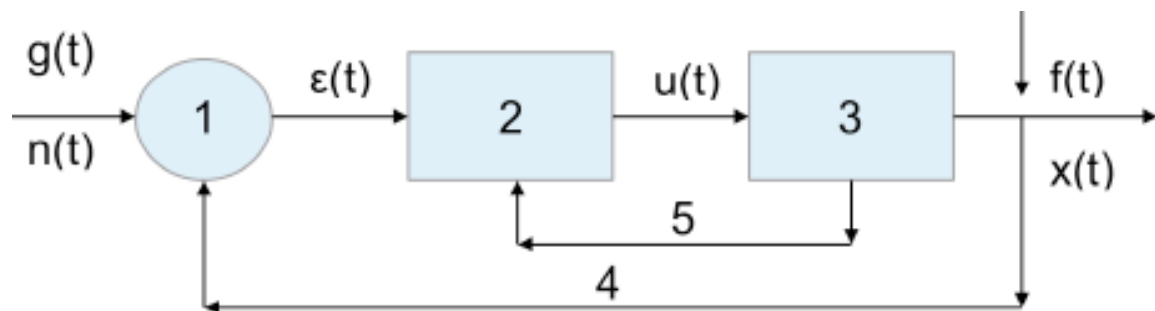
### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Проведено аналіз відомих критеріїв, які традиційно використовуються для керування процесом сушіння та встановлено їх недоліки при використанні для оцінювання якості керування процесом прогрівання паперового полотна.
2. Запропоновано новий критерій оптимального керування процесом прогрівання паперового полотна з урахуванням технологічних особливостей даного етапу сушіння.
3. Розроблена математична модель, яка пов'язує параметрами якості паперового полотна та керувальні змінні.
4. Розроблено алгоритм розрахунку оптимального температурного графіка прогрівання паперового полотна з урахування обмежень на параметри якості і особливостей теплопереносу на даному етапі сушіння.
5. На основі розробленого алгоритму створено спеціальне програмне забезпечення для розрахунку оптимального температурного графіка прогрівання паперового полотна.

## РОЗДІЛ 4

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПРОГРІВАННЯ ПАПЕРОВОГО  
ПОЛОТНА В СУШИЛЬНІЙ ЧАСТИНІ ПАПЕРОРІБНОЇ МАШИНИ4.1 Базова структура системи керування процесом прогрівання паперового  
полотна

За основу структури системи керування процесом прогрівання паперового полотна було взято класичний варіант слідкувальної системи з додатковим зворотнім зв'язком (рис. 4.1) [72].



$g(t)$  – задана вхідна величина;  $n(t)$  – вхідні збурення;  $\epsilon(t)$  – сигнал розузгодження;  $u(t)$  – сигнал керування;  $f(t)$  – збурення в об'єкті керування;  $x(t)$  – вихідна величина;

1 – пристрій порівняння; 2 – регулятор; 3 – об'єкт керування з виконавчим механізмом; 4 – головний зворотний зв'язок; 5 – допоміжний зворотний зв'язок.

Рисунок 4.1 – Структурна схема типової слідкувальної системи

За результатами отриманих досліджень проведено вдосконалення системи виду (рис. 4.1) з урахуванням особливостей протікання технологічного процесу, що розглядається та визначених задач для системи керування процесом прогрівання паперового полотна. Базова структурна схема системи адаптивного оптимального керування процесом прогрівання паперового полотна зображена на рис. 4.2.

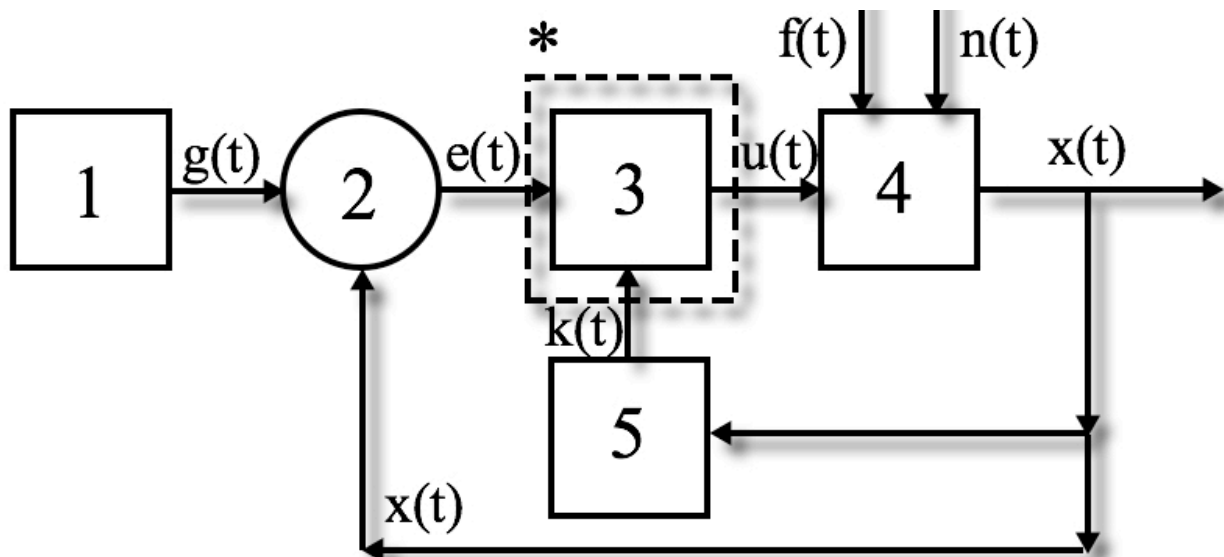


Рисунок 4.2 – Базова структурна схема системи адаптивного оптимального керування процесом прогрівання паперового полотна

Для забезпечення ефективного керування процесом прогрівання паперового полотна необхідно володіти оперативною інформацією про зміну завдання для регулятора у відповідності до параметрів сушильної частини та паперового полотна, що поступає на сушіння. Для виконання даного завдання в систему інтегровано блок розрахунку оптимального температурного графіка прогрівання паперового полотна (блок 1 рис. 4.2).

В основу його роботи покладено алгоритм розрахунку, що наведено в розділі 3, який враховує обмеження на зміну величини температури паперу на кожному сушильному циліндрі та особливості теплообміну між полотном і сушильним циліндром (полотном і повітрям на ділянці вільного руху) у залежності від значення температури самого полотна [73].

Блок 2 (рис. 4.2) виконує функцію пристрою порівняння та має на вході два масиви інформації:

1. Масив оптимальних температур на виході з кожного сушильного циліндра,  $g(t)$ ;
2. Поточні значення температури  $x(t)$ , отримані з об'єкта керування по каналу зворотного зв'язку.

На виході блоку 2 (рис. 4.2) отримуємо сигнал розузгодження значення температури паперового полотна між оптимальним температурним графіком прогрівання паперового полотна  $g(t)$ , отриманим з блоку 1 (рис. 4.2) та даних з об'єкта керування  $x(t)$ , блок 4 (рис. 4.2).

Значення розузгодження  $e(t)$  (вихід блоку 2) поступає до блоку регулювання 3. Його головною задачею є, на основі отриманих вхідних даних (сигнал розузгодження  $e(t)$  та оцінки величини збурювальних впливів на об'єкті керування  $k(t)$ ), розрахувати масив керувальних впливів  $u(t)$ , що призведе до мінімізації критерію керування (3.1) з врахуванням усіх накладених обмежень.

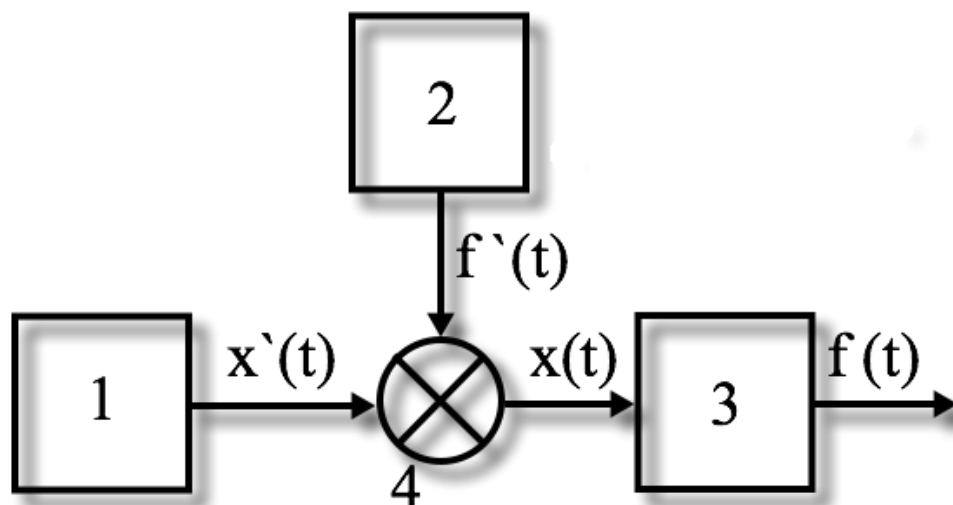
Робота блоку визначення рівня збурення в системі (блок 5 рис. 4.2) полягає в аналізі даних з об'єкта керування про величину температури паперу на основі ряду послідовних вимірювань та обробки цих даних за допомогою статистичних методів.

Вихідне значення температури паперового полотна на виході з кожного сушильного циліндра надходить в блок-аналізатор рівня збурень (блок 5 рис. 4.2). Оскільки, збурення на об'єкті керування мають випадковий характер [74], тому немає можливості в реалізації системи його прогнозування. Однак, є можливість визначення його рівня, що надає можливість реалізації більш гнучкої системи керування. Для коректності визначення оцінки рівня збурення в системі необхідно отримувати дані про температуру паперового полотна протягом певного інтервалу роботи системи.

Для визначення величини вибірки, а отже і часу дискретизації підсистеми визначення рівня збурення, на основі якої буде формуватися оцінка значення величини збурення в системі було поставлено експеримент на математичній моделі ділянки прогрівання паперового полотна [75].

В дану математичну модель введено генератор збурювальних впливів (для проведення експерименту послідовно подано збурення 2%, 5%, 10%, 15% та 20% від вимірювальної величини температури на кожному сушильному циліндрі) з нормальним законом розподілення функції випадкової величини [76]. На виході об'єкта було встановлено блок аналізатора збурювального впливу та послідовно

налаштовано на різну кількість вимірювань, на основі яких розраховано оцінку значення збурювального впливу (рис. 4.3).



$x'(t)$  – вихідний сигнал з об'єкта керування за збурювального впливу;  $f'(t)$  – вихідне значення з генератора випадкового збурювального впливу;  $x(t)$  – вихідний сигнал зі збурювальним впливом;  $f(t)$  – результат роботи блоку аналізатора збурювального впливу (величина збурення); 1 – об'єкт керування; 2 – генератор збурювального впливу; 3 – блок аналізатора збурювального впливу; 4 – суматор.

Рисунок 4.3 – Схема системи введення випадкового збурювального впливу в об'єкт керування

Оброблені усереднені результати 80 дослідів для кожної з величини збурювального впливу показали наступні результати, які наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати роботи блоку визначення рівня збурення на об'єкті

Кількість вимірювань	Розраховане значення збурю вального впливу
1	2
	2%
1	0.8269
5	1.4071

Продовження таблиці 4.1

1	2
10	2.2317
12	2.0143
15	2.03032
20	2.0161
5%	
1	2.3024
5	4.3953
10	4.2998
12	5.0566
15	4.9237
20	4.9565
10%	
1	10.9548
5	12.5977
10	11.6004
12	10.4118
15	9.6704
20	9.9359
15%	
1	22.7719
5	17.8201
10	17.4569
12	15.3974
15	15.2987
20	14.881
20%	
1	34.9278

Закінчення таблиці 4.1

1	2
5	24.2674
10	18.9612
12	20.4192
15	20.4064
20	20.1937

Таблиця 4.2 – Обробка експериментальних даних

Рівень збурення	Абсолютна похибка вимірювань, %					
	2	5	10	15	20	Середнє значення, %
1	1.1731	2.6976	0.9548	7.7719	14.9278	5.50504
5	0.5929	0.6047	2.5977	2.8201	4.2674	2.17656
10	0.2317	0.7002	1.6004	2.4569	1.0388	1.2056
12	0.0143	0.0566	0.4118	0.3974	0.4192	0.25986
15	0.03032	0.0763	0.3296	0.2987	0.4064	0.228264
20	0.0161	0.0435	0.0641	0.119	0.1937	0.08728

Наведені у табл. 4.2 дані відображають лише частину проведених експериментальних досліджень. Вибірки з 21 і більше досліджень показали аналогічні результати з даними за 20 вимірів (відхилення становить менше 1%), тому у подальшому дослідженні вони не будуть розглядатися.

На основі аналізу отриманих експериментальних даних було встановлено, що оптимальним у співвідношенні точність – швидкодія, є формування значення збурювальних впливів після кожних 12 послідовних вимірювань.

## 4.2 Внутрішня структура блоку регулювання у системі оптимального керування процесом прогрівання паперового полотна

З аналізу існуючих рішень та огляду літератури щодо сучасних систем автоматизації, які розглядалися у розділі 1, для дослідження обрано декілька варіантів внутрішньої структури регулятора:

- регулятор на основі методу динамічного програмування;
- ПІД- регулятор з алгоритмом автоналаштування параметрів;
- три ПІД-регулятори зі змінною структурою об'єкту керування та алгоритмом автоналаштуванням;
- комбінована структура: метод динамічного програмування + ПІД-регулятор;
- комбінована структура: метод динамічного програмування + три ПІД-регулятори зі змінною структурою об'єкту керування та алгоритмом автоналаштуванням;

## 4.3 Порівняльний аналіз блоків регулювання у структурі системи оптимального керування

### 4.3.1 Метод динамічного програмування у задачі оптимального керування прогріванням паперового полотна

У динамічному програмуванні для керованого процесу серед множини усіх допустимих управлінь шукають оптимальне з точки зору деякого критерію. Тобто, такий набір значень, що призводить до екстремального (найбільшого або найменшого) значення цільової функції – деякої числової характеристики процесу.

Критерієм оптимального керування для даного технологічного процесу є мінімізація відхилення температури паперу на виході з кожного сушильного циліндра від оптимального значення [77] з врахуванням обмежень на керувальні впливи (витрата пари в сушильні циліндри), параметри якості паперового полотна (залежать від виду продукції що виробляється). Визначено, що загальна функціональна залежність якості керування буде мати наступний вигляд:

$$I_i = f\left(T_{i-1}^{real}, F_i, T_i^{zad}, t\right),$$

де  $T_{i-1}^{real}$  – температура паперу на виході з попередньої ділянки вільного руху, °С;  $F_i$  – витрата пари в поточний сушильний циліндр, кг/уч; уч – проміжок часу перебування паперу на сушильному циліндрі, що розраховується на основі швидкості папероробної машини та геометричних розмірів елементів сушильної частини;  $T_i^{zad}$  – завдання по температурі паперу на виході з поточного сушильного циліндра, °С;  $t$  – момент спостереження, с;

Зменшення  $I_i$  для кожного  $i=0\dots n$ , свідчить про наближення реального температурного графіку прогрівання паперового полотна до оптимального, розрахованого у відповідності до алгоритму наведеного у розділі 3.

Якщо показник якості керування після  $i$ -го кроку до останнього позначимо як  $I_{i+1}^*$ , тоді показник якості керування від  $i$ -го кроку до останнього буде мати вигляд:

$$I_{i \rightarrow n} = f\left(T_{i-1}^{real}, F_i, T_i^{zad}, t\right) + I_{i+1}^*. \quad (4.1)$$

На основі отриманої рекурентної формули (4.1), відомого початкового значення  $T_0^{real}$ , математичної моделі сушильної частини ПРМ [75] та запропонованого алгоритму розрахунку (рис. 4.3), отримуємо значення критерію оптимального керування на першому кроці, оптимальне значення  $F_1$  та значення  $T_1^{real}$ .

Схематично розрахунок для всіх кроків можна навести у вигляді як показано на рис. 4.4.

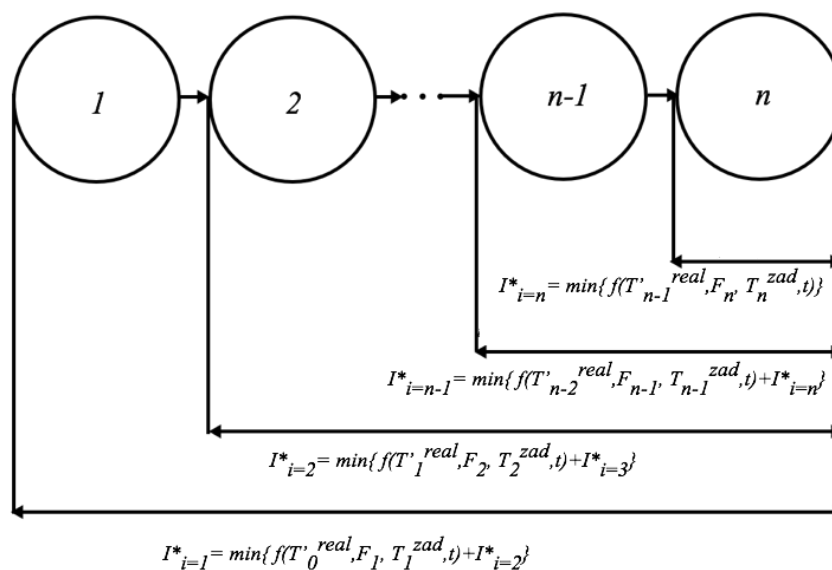


Рисунок 4.4 – Схема розрахунку значення критерію оптимального керування методом динамічного програмування

Після отримання на першому кроці розрахункових даних, проводимо розрахунок для всіх наступних кроків. За результатами розрахунків отримуємо масив значень  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ , за якого критерій оптимального керування набуде свого мінімального значення.

Перерахунок величини керувального впливу відбувається на основі інформації про температуру паперу на початку етапу сушіння з інтервалом  $\Delta t$ , що визначається часом відгуку встановленого датчика температури, або може задаватись оператором в ручному режимі.

#### 4.3.2 Метод динамічного програмування за мінімального рівня збурення у системі

В цьому режимі дослідження для моделювання роботи системи на математичній моделі [75] рівень збурень та коливання вхідних параметрів встановлено на рівня менше 1%.

Розрахунок проводили з інтервалом часу 1,08 секунди, що відповідає тривалості перебування паперу на сушильному циліндрі.

З метою наглядного моніторингу динаміки досягнення екстремумів в цьому режимі, результати розрахунків отримано у вигляді графіка зміни у часі суми відхилень температур паперу на виході з кожного сушильного циліндра від оптимального значення наведеного на рис. 4.5.

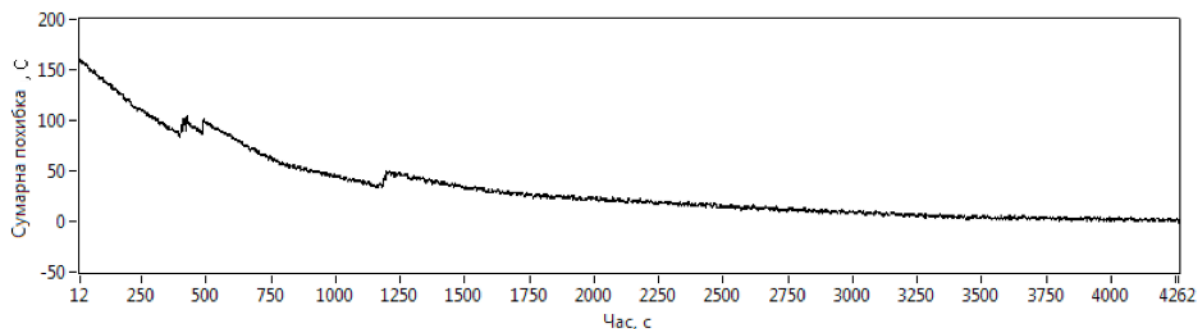


Рисунок 4.5 – Динаміка зміни сумарної похибки в часі за мінімального рівня збурення у системі

Проаналізувавши отримані результати, можна зробити висновок, що за мінімального рівня збурення у системі метод динамічного програмування розв'язує поставлену задачу керування, оскільки сумарне значення критерію оптимального керування досягає свого екстремуму  $\approx$  нуль.

#### 4.3.3 Метод динамічного програмування за наявності збурень у системі

Будь-який технологічний об'єкт керування не може функціонувати без дії на нього зовнішніх та внутрішніх збурень. Для перевірки ефективності методу динамічного програмування для керування процесом прогрівання було використано генератор збурювального впливу з нормальним законом розподілу випадкової величини (блок 2 рис 4.3) і математичну модель тепло- та масопреносу на

сушильному циліндрі і ділянці вільного руху, що була розроблена у розділі 2 (2.14 – 2.18).

В цьому режимі дослідження, рівень збурень у системі встановлено на наступних рівнях: 1%, 5%, 10%, 20% від величини реальної температури паперового полотна. Результати роботи системи у вигляді графіка сумарної похибки показано на рис. 4.6.

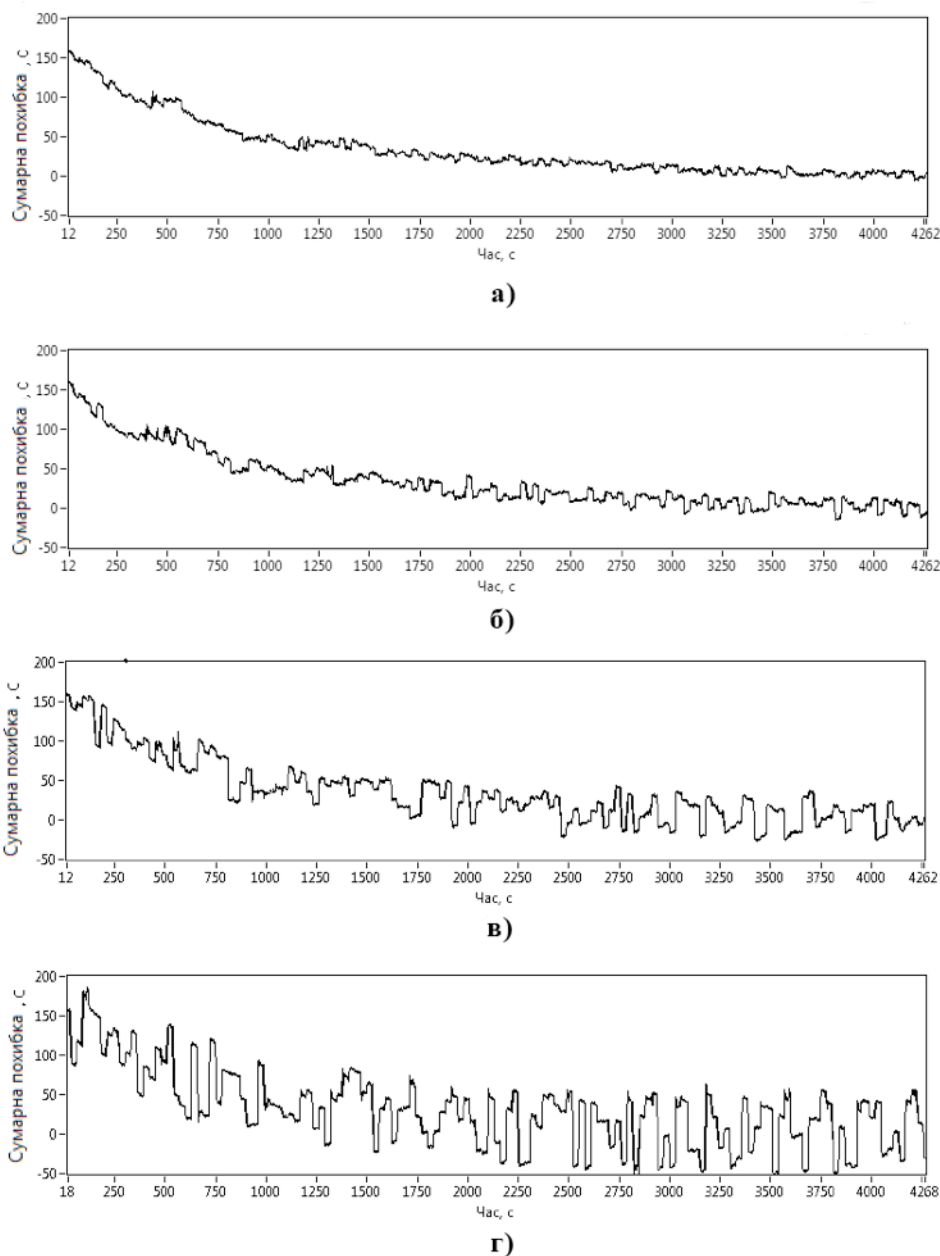


Рисунок 4.6 – Динаміка зміни сумарної похибки в часі за різного рівня збурень:

а) рівень збурення 1%; б) рівень збурення 5%; в) рівень збурення 10%; г) рівень збурення 20%;

В ході аналізу отриманих даних було встановлено, що використання методу динамічного програмування є ефективним для керування процесом прогрівання паперового полотна в сушильній частині папероробної машини за рівня збурення у системі менше 10% (рис 4.6а, б). Однак, за більших значень збурення (рис 4.6в, г) коливання відхилення реальної температури від температурного графіка прогрівання перевищує допустимі межі (на виході з декількох циліндрів розходження становило більше  $8^{\circ}\text{C}$  за допустимого значення  $5^{\circ}\text{C}$ ), та може призвести до значного зниження показників якості готової продукції.

#### 4.3.4 Використання одного ПІД-регулятора для системи оптимального керування

Найбільш поширеним у системах керування є ПІД-регулятор не дивлячись на те, що визначення параметрів налаштування даного регулятора є надзвичайно складною задачею [78-80]. Для спрощення реалізації цієї задачі розроблено та запрограмовано алгоритми автоналаштування параметрів. Один з таких алгоритмів реалізовано у вигляді об'єктно-орієнтованого програмного блоку компанією National Instruments, що має назву “PID with autotuning VI” [81].

Завдання, що покладається на ПІД-регулятор, для даного технологічного процесу полягає у визначенні величини керувального впливу (витрати пари у кожний сушильний циліндр), яка буде забезпечувати дотримання оптимального температурного графіка прогрівання паперового полотна.

Об'єктно-орієнтований програмний блок “PID with autotuning VI” обробляє дані про поточне значення температури паперу на виході із сушильного циліндра та порівнює його з оптимальним розрахунковим значенням. На основі оброблених даних та значення вхідних параметрів здійснюється підбір оптимальних параметрів налаштування регулятора.

При тестуванні розробленої системи з ПІД-регулятором враховувались наступні показники:

1. кількість сушильних циліндрів;
2. рівень виміряного шуму в системі;
3. час пошуку оптимальних параметрів регулятора;
4. значення отриманих параметрів налаштування.

Результати дослідження наведено у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати роботи блоку “PID with autotuning”

Номер досліджу	Кількість циліндрів	Рівень шуму, %	Час, с	Значення параметрів ( $K_p$ / $t_i$ / $t_d$ )
1	1	5	5,8	15,7/0,05/0,007
2	2	5	6,4	15,2/0,053/0,007
3	3	5	6,8	17,2/0,069/0,008
4	4	5	7,3	17,6/0,067/0,008
5	5	5	7,5	17,9/0,067/0,008
5	6	5	7,6	19,8/0,082/0,01
<b>6</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>8,1</b>	<b>20/0,084/0,01</b>
7	8	5	9,0	20,3/0,87/0,01
8	3	1	2,1	7,9/0,43/0,008
9	3	10	40,1	39,1/0,03/0,008
10	4	1	2,4	10,1/0,19/0,008
11	4	10	82	63,7/0,07/0,008
12	6	1	2,7	12/0,69/0,01
13	6	10	114,5	119,1/0,11/0,01
<b>14</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>2,7</b>	<b>13,2/0,71/0,01</b>
<b>15</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>133,6</b>	<b>142,4/0,12/0,01</b>

Вибірка даних у таблиці відображає лише частину проведених досліджень, які найбільш точно описують динаміку зміни вихідних значень (час роботи блоку автоналаштування, значення параметрів) в залежності від зміни кількості сушильних циліндрів та рівня шуму.

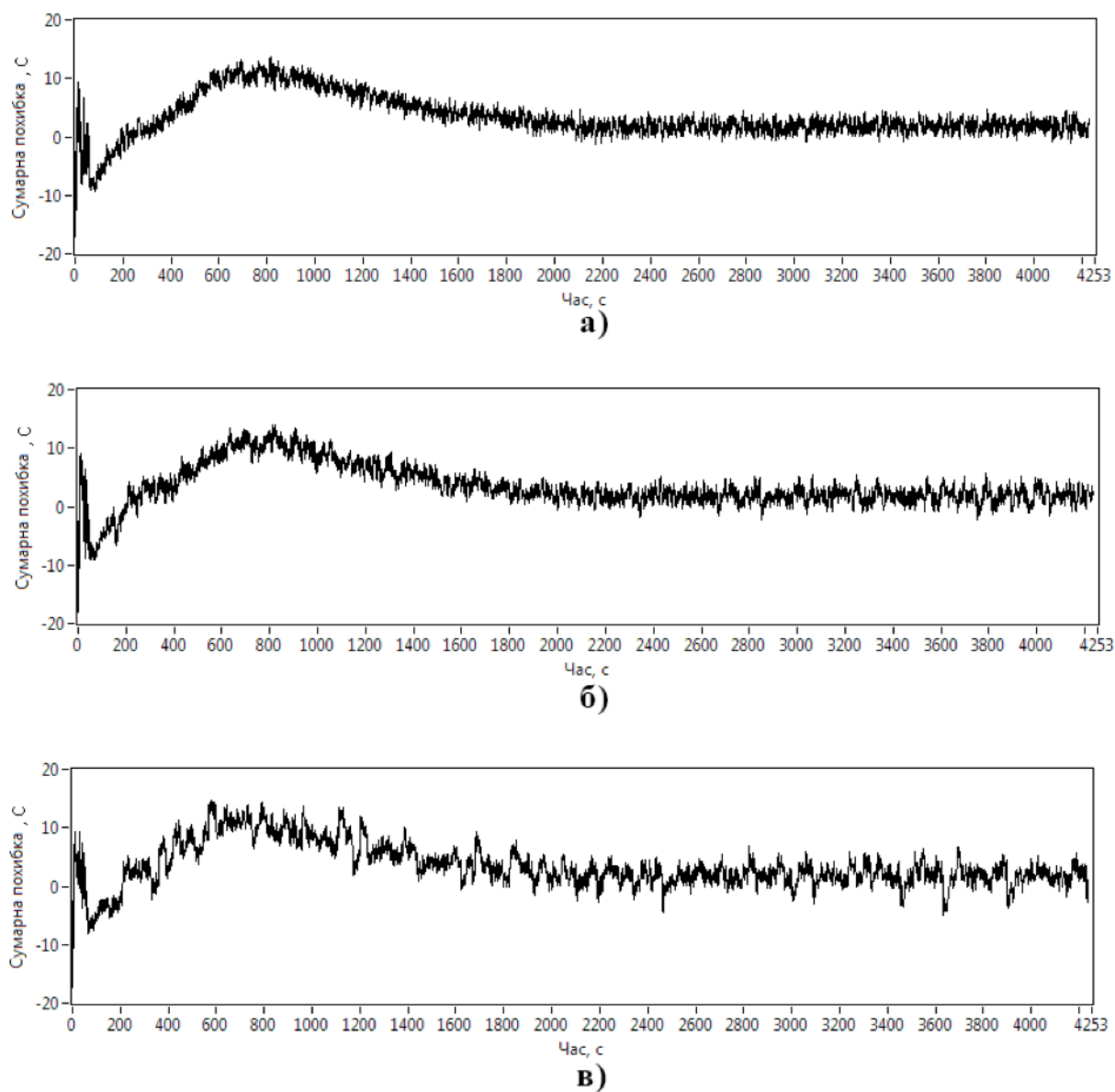


Рисунок 4.7 – Динаміка зміни сумарної похибки у часі в системі з 1-м ППД - регулятором за рівня збурення: а) 1%; б) 10%; в) 20%

Результати проведеного дослідження свідчать про наступне :

1. В разі збільшення кількості сушильних циліндрів час пошуку оптимальних параметрів налаштування майже не змінний. Це пов'язано з однотипністю протікання процесу нагрівання паперового полотна на кожному сушильному

циліндрі. Однак, за певної кількості сушильних циліндрів 3, 6 відбувається значна (у порівнянні із змінами на меншій кількості сушильних циліндрів) зміна отриманих оптимальних параметрів. Таке явище обумовлено інтервалами нелінійності в математичній моделі прогрівання паперового полотна. Вони викликані критичними точками ( $40^{\circ}\text{C}$  та  $80^{\circ}\text{C}$ ) температури паперового полотна на виході із сушильного циліндра, що призводить до змін в коефіцієнтах теплообміну на ділянках вільного руху.

2. Зміна значення рівня шуму у системі є ключовим елементом, який пов'язаний з тривалістю пошуку оптимальних параметрів налаштування регулятора. За умови збільшення рівня шуму в системі значення часу пошуку експоненціально збільшується.

Виходом з даної ситуації є використання 3-х “плаваючих” ПД-регуляторів. Особливість їх роботи полягає у динамічній зміні кількості сушильних циліндрів, для яких кожен з регуляторів розраховує керувальний вплив у залежності від значень температури полотна на виході з циліндрів. Як видно з результатів експериментальних досліджень, за однакового рівня збурювальних впливів у системі (10%), час пошуку оптимальних параметрів налаштування регулятора: для 3-х циліндрів становить 40 секунд, для 4-х – 82, а для 7-ми – 133,6.

Підхід з використанням 3-х “плаваючих” ПД-регуляторів дає змогу розбити процес прогрівання паперового полотна на ділянки по декілька циліндрів, розрахунок керувальних впливів для яких може бути проведено паралельно, що значно пришвидшує роботу всієї системи керування.

Порівняльна оцінка даних зміни сумарного відхилення для методу динамічного програмування та ПД-регулятора за рівня збурень до 10% показує, що кінцева сумарна похибка однакова, однак, час роботи системи з ПД-регулятором є більшим. Ця особливість пов'язана з присутністю часу автоналаштування параметрів регулятора та збільшується в разі збільшення кількості сушильних циліндрів.

З метою пришвидшення роботи системи автоналаштування параметрів розглянуто використання декількох ПД-регуляторів, що будуть відповідати за роботу різних сушильних циліндрів.

#### 4.3.5 Використання трьох ПД-регуляторів зі змінною структурою об'єкту керування та алгоритмом автоналаштуванням

Процес прогрівання паперового полотна належать до об'єктів керування, що описуються моделями з нелінійними характеристиками. Тому для здійснення якісного керування ними ефективніше використовувати підхід, що полягає у ідентифікуванні в процесі його нормального функціонування параметрів, що змінюються в часі, а потім використати їх для підстроювання регуляторів.

Нелінійністю характеристики процесу прогрівання паперового полотна викликана критичними значеннями температури паперу, за яких відбувається зміна коефіцієнтів теплопровідності між паперовим полотном та сушильним циліндром (паперовим полотном і повітрям на ділянці вільного руху), запропоновано використання трьох ПД-регуляторів зі змінною структурою об'єкту керування для кожного та алгоритмом автоналаштуванням ("PID with autotuning") [82] для різних діапазонів зміни температури (до 40; 40...80; понад 80°C) з автоматичним перерозподілом кількості циліндрів, на які розповсюджується вплив кожного з регуляторів.

Алгоритм перерозподілу зон пливу кожного з ПД-регуляторів, у відповідності до температури паперового полотна на виході з сушильних циліндрів наведено на рис. 4.8

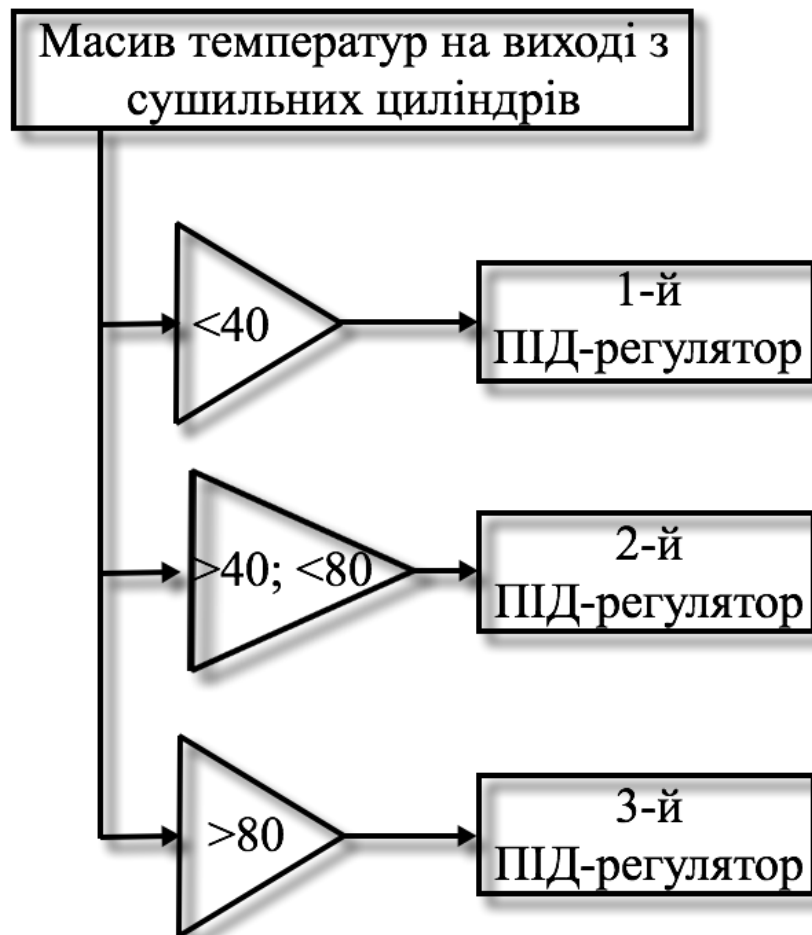


Рисунок 4.8 – Алгоритм розподілу сушильних циліндрів(змінна структури об'єкту керування) між трьома ПІД-регуляторами в залежності від температури паперу на виході з циліндрів

Дослідження розробленого рішення проводились на наступній конфігурації об'єкту керування:

- 8 сушильних циліндрів на етапі прогрівання паперового полотна;
- три ПІД-регуляторами зі змінною структурою об'єкту керування та алгоритмом автоналаштуванням;
- рівень збурення в системі згенерований на рівні 10%.

Отриманий на результатами дослідження графік зміни величини сумарної похибки за температурою має наступний вигляд (рис. 4.9):

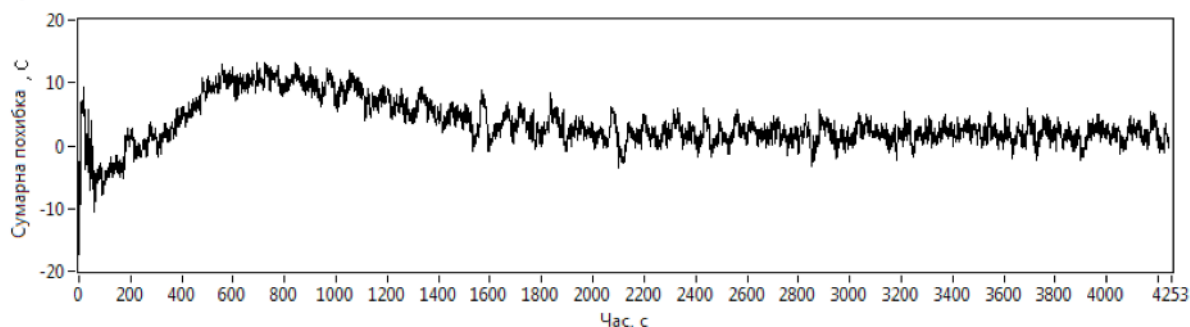


Рисунок 4.9 – Динаміка зміни сумарної похибки у часі в системі з трьома ПІД-регуляторами зі змінною структурою об'єкту керування та алгоритмом автоналаштуванням за рівня збурення 10%

Результати роботи системи з трьома ПІД-регуляторами зі змінною структурою об'єкту керування з алгоритмом автоналаштування параметрів наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати автоналаштування трьох ПІД-регуляторів зі змінною структурою об'єкту керування

Номер ПІД-регулятора	Кількість циліндрів	Рівень шуму, %	Час, с	Значення параметрів ( $K_p/t_i/t_d$ )
1	3	10	38,2	41,7/0,043/0,007
2	3	10	37,9	40,1/0,045/0,007
3	2	10	22,2	47,2/0,042/0,007

Дані, що наведено в табл. 4.4, відображають усереднені значення налаштування блоку регуляторів на основі 100 проведених паралельних дослідів з використанням розробленої математичної моделі [75].

Проаналізувавши експериментальні дані роботи системи з 1-м та 3-ма ПІД-регуляторами за однакової конфігурації об'єкта керування та рівня збурювальних впливів, можна зробити висновок, що швидкість системи автоналаштування значно більша (38,2 секунди у порівнянні з 133,6 секунд) в системі трьома ПІД-регуляторами зі змінною структурою об'єкту керування за збереження високої

точності керування (сумарне відхилення температури паперу на виході із сушильних циліндрів від оптимального температурного графіка не перевищує 5%).

#### 4.3.6 Комбіноване керування: метод динамічного програмування + ПД-регулятор

Проаналізувавши отримані дані, про роботу системи керування, можна зробити практичний висновок. З одного боку, використання варіанту регулювання у вигляді трьох ПД-регуляторів зі змінною структурою об'єкту керування є найбільш ефективним для керування процесом з високим рівнем збурювальних впливів. З іншого боку, регулятор на основі методу динамічного програмування показав високу ефективність роботи за невеликих збурень та має більшу швидкодію у порівнянні з ПД-регуляторами.

Тому, найбільш раціональним буде використання комбінованої структури системи керування процесом прогрівання паперового полотна (рис. 4.10).

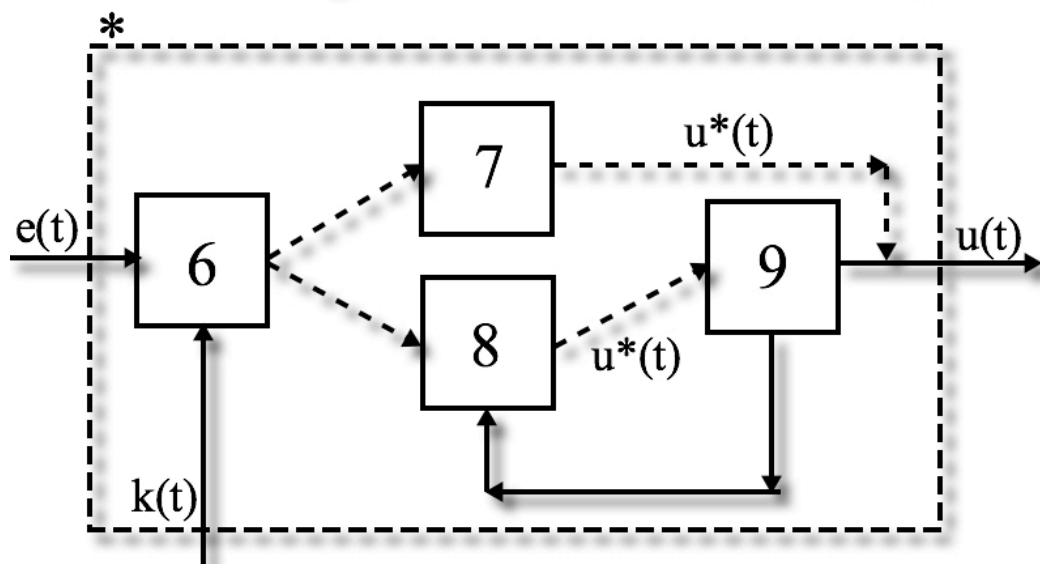


Рисунок 4.10 – Внутрішня структура блоку регулювання у системі оптимального адаптивного керування процесом прогрівання паперового полотна

Робота такої системи відбувається наступним чином: сигнал похибки керування (різниця між поточним і оптимальним графіком температури паперового полотна)  $e(t)$  та величина збурювального впливу  $k(t)$  надходять до блоку селектора регулятора (блок 6 рис. 4.10). Його задачею є, на основі отриманої інформації, перемикання режимів роботи регулятора – на основі методу динамічного програмування (блок 7 рис. 4.10), або з використанням трьох ПД-регуляторів зі змінною структурою об'єкту керування з алгоритмом автоналаштування параметрів (блок 8 рис. 4.10). У разі перемикання на блок 7 розрахунок значень керувальних впливів відбувається на основі методу динамічного програмування та його значення  $u^*(t)$  надходять на виконавчі механізми об'єкту керування. Якщо селектор перемкнув роботу системи на блок 8 (три ПД-регулятори зі змінною структурою об'єкту керування з алгоритмом автоналаштування параметрів), система на основі початкових параметрів регулятора розраховує керувальні впливи  $u^*(t)$  та надсилає його на блок перевірки даних роботи системи керування.

Технологічний процес прогрівання паперового полотна відбувається за швидкості руху паперового полотна до 600 м/хв. Це означає, що навіть за незначний проміжок часу роботи системи за не оптимального керування, можна отримати велику кількість паперу незадовільної якості. Для запобігання таких випадків при роботі розробленої системи керування, на основі розрахованого масиву керувальних впливів пропонується виконувати їх перевірку за допомогою розробленої математичної моделі (блок 9 рис. 4.10). Для оперативності роботи системи було реалізовано математичне моделювання з коефіцієнтом прискорення, що з використанням сучасного рівня комп'ютерної техніки може спричинити незначну затримку у оперативності керування. У той же час, такий підхід надає можливість без втручання у сам технологічний процес, перевірити якість запропонованого керування та у випадку незадовільного результату повернути інформацію до блоку ПД-регуляторів для переналаштування параметрів його роботи та отримання нових, покращених значень керувальних впливів.

Запропоноване технічне рішення дає змогу пришвидшити роботу системи оптимального керування шляхом запобігання перерахунку параметрів

налаштування ПІД-регуляторів на кожній ітерації розрахунку тільки за незадовільних даних, отриманих за результатами математичного моделювання.

За результатами роботи системи оптимальне значення витрати пари надходить до регулювальних органів, встановлених на вході у кожний сушильний циліндр.

Порівняння роботи синтезованої системи проводилось разом із системою з використанням лише трьох ПІД-регуляторів зі змінною структурою об'єкту керування.

Проведені експериментальні дослідження розробленої системи керування показали наступні результати:

1. За низьких рівнях збурювального впливу система керування працює на основі методу динамічного програмування та за короткий проміжок часу виводить відхилення температури паперового полотна на виході із сушильних циліндрів до майже нульового значення (максимальне відхилення складає 1,2 °С).

2. В разі перевищення 10 % рівня збурювальних впливів система керування переходить на роботу блоку керування з трьома ПІД-регуляторами зі змінною структурою об'єкту керування з алгоритмом автоналаштування параметрів. Час першого налаштування параметрів регулятора – у межах 35 секунд. За подальшого пере налаштування – час зменшується до 20-26 секунд.

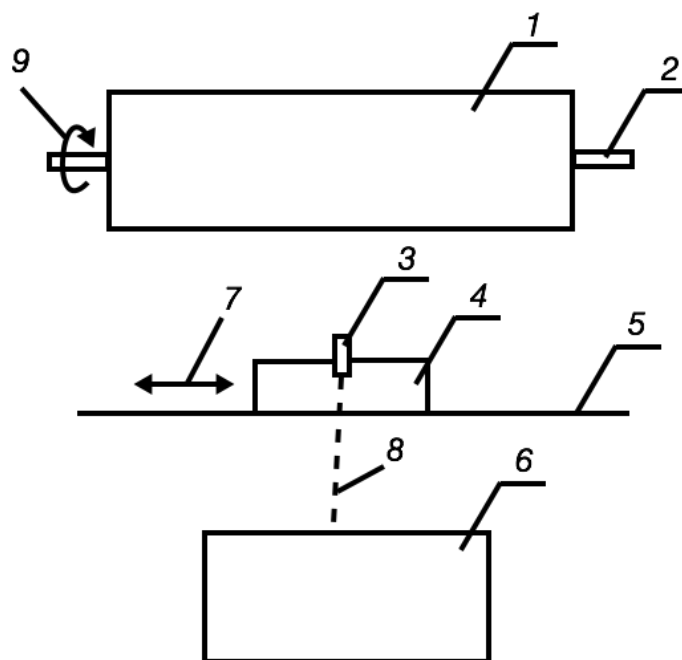
3. Час перевірки якості розрахованого масиву керувальних впливів на математичній моделі займає не більше 4 секунд і може бути зменшено у випадку зміни коефіцієнта прискорення. Величина даного коефіцієнта обмежується лише потужністю обчислювальної техніки.

#### 4.4 Вибір технічних засобів автоматизації для реалізації створеної системи автоматичного керування

Як було визначено раніше, процес сушіння паперового полотна є надзвичайно швидким технологічним процесом та для забезпечення найбільш ефективного керування потребує інформацію про значення технологічних параметрів у режимі реального часу з мінімальною затримкою оновлення інформації.

Ключовим елементом роботи кожної системи є датчики для отримання оперативних даних про протікання технологічного процесу. У випадку процесу прогрівання паперового полотна основною інформацією є температура паперу на виході з кожного сушильного циліндра.

З метою реалізації керування даним технологічним процесом необхідно отримувати дані про температуру паперу та сушильного циліндра. Це забезпечується шляхом використання розробленого датчика температури [83]. Дане технічне рішення є вдосконаленням попередніх [84] і усуває їх недоліки. На рис. 4.11 зображена будова датчика з безпроводним каналом передачі інформації:



1 – сушильний циліндр; 2 – вісь обертання; 3 – пірометр; 4 – рухома підставка; 5 – направляючі рейки; 6 – операторська панель обробки інформації; 7 – напрямок руху; 8 – канал бездротового зв'язку; 9 – напрям руху сушильного циліндра.

Рисунок 4.11 – Структура розробленого датчика температури:

Робота даного приладу полягає в наступному: сушильний циліндр 1 обертається навколо осі 2 у напрямку зазначеному стрілкою 9. Під сушильним циліндром 1, на рухомій підставці 4, розташовано пірометр 3, який направлено на частину сушильного циліндра, яка не контактує з паперовим полотном (для вимірювання температури сушильного циліндра), або на папір на виході з нього

(для вимірювання температури паперового полотна на виході з СЦ). Рухома підставка 4 постійно рухається по направляючих рейках 5 вздовж осі сушильного циліндра 1. Під час переміщення рухомої підставки 4, пірометр 3 вимірює значення температури 1 по всій його ширині. Виміряне значення з пірометра 3, по каналу 8 бездротового зв'язку передається на операторську панель 6 обробки інформації. З отриманих даних будується температурне поле сушильного циліндра (паперового полотна), що дає змогу реалізувати керування процесом сушіння паперового полотна.

Таким чином, прилад дозволяє отримати інформацію про температуру у кожній точці сушильного циліндра та паперового полотна за його довжиною.

Для отримання повної інформації, з метою реалізації ефективної системи керування, необхідно отримувати дані про температуру паперу (циліндра) на виході з кожного сушильного циліндра. У зв'язку з цим запропонований прилад встановлюють на кожному з них. Дані з кожного такого датчика по каналах безпроводного зв'язку збираються серверним додатком встановленим на операторській панелі.

Ця інформація у вигляді масиву даних надходить у розроблене програмне рішення [85-86]. В нього інтегровані блоки:

1. Розрахунку оптимального температурного графіка прогрівання паперового полотна.
2. Аналізатора відхилення поточних значень температурного графіка від оптимального.
3. Визначення рівня збурень у системі.
4. Селектора алгоритму визначення масиву оптимальних керувальних впливів.
5. Регулятор з використанням методу динамічного програмування.
6. Регулятор на основі 3-х плаваючих ПІД-регуляторів з алгоритмом автоналаштування.
7. Імітатор процесу прогрівання для перевірки якості розрахованого масиву керувальних впливів на основі розрахованого критерію оптимального керування.

На виході розробленого програмного продукту отримується масив керувальних впливів – значення витрати пари у трубопроводі кожного сушильного циліндра.

Отримані дані передаються на виконавчі механізми (електропривід). У зв'язку з унікальністю кожної папероробної машини підібрати універсальні виконавчі механізми неможливо, однак можна сформулювати основні вимоги до них:

1. Можливість роботи в середовищі з високою температурою і тиском.
2. Висока швидкодія.
3. Захист від зовнішніх забруднюючих факторів.
4. Наявність інтерфейсу для передачі інформації про стан роботи виконавчого механізму на панель оператора.

#### ВИСНОВКИ ДО РОЗДЛУ 4

1. Розроблено раціональну структуру системи керування прогрівання паперового полотна на основі даних про технологічний процес та оцінки рівня збурювальних впливів у системі.

2. Синтезовано систему керування процесом прогрівання паперового полотна з використанням методу динамічного програмування, ПД-регуляторів та методів їх автоналаштування.

3. Налаштовано блок визначення оцінки рівня збурювальних впливів у системі та оптимізовано його роботу для використання у системі керування прогріванням паперового полотна.

4. Проведено дослідження роботи синтезованої системи керування в умовах різного рівня збурювальних впливів, результати якого продемонстрували ефективність розробленої системи у порівнянні з існуючими на сьогоднішній день рішеннями.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна науково-практична задача створення системи автоматизації керування процесом прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини, яка забезпечує підвищення ефективності її роботи за рахунок ресурсо- та енергозбереження за високої якості готової продукції.

Основні наукові висновки і практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведений аналіз літературних джерел показав можливості на основі сучасних досягнень науки і техніки удосконалити існуючі технічні рішення в області систем керування процесом прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини, що забезпечує функціонування обладнання у режимі ресурсо- та енергозбереження з підтримкою високого рівня якості паперового полотна.

2. Розроблено математичну модель тепло- та масопереносу для етапу прогрівання паперового полотна у відповідності до механізму тепломасопереносу та особливостей внутрішньої структури паперового полотна.

3. Проведено дослідження розробленої математичної моделі на адекватність реальному технологічному процесу прогрівання паперового полотна з використанням статистичних критеріїв Ст'юдента та Фішера.

4. Для оптимізації технологічного процесу прогрівання паперового полотна розроблено алгоритм розрахунку оптимального температурного графіка його прогрівання з урахування обмежень на параметри якості і особливостей теплопереносу на даному етапі сушіння.

5. На основі розробленого алгоритму створено спеціальне програмне забезпечення для розрахунку оптимального температурного графіка прогрівання паперового полотна.

6. Синтезовано систему керування процесом прогрівання паперового полотна з використанням методу динамічного програмування, ПІД-регуляторів і системи їх автоналаштування.

7. Налаштовано блок визначення оцінки рівня збурювальних впливів у системі та оптимізовано його роботу для використання у системі керування прогріванням паперового полотна.

8. Результати дослідження розробленої системи оптимального керування процесом прогрівання паперового полотна в сушильній частині папероробної машини підтвердили ефективність запропонованої системи керування.

9. Матеріали дисертації роботи передано на виробництво до ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат» місто Обухів, Київська область.

10. Результати роботи впроваджено у навчальний процес на кафедрі «Автоматизації хімічних виробництв» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Фляте Д. М. Технология бумаги / Д. М. Фляте.– М.: Лесная промышленность, 1988. – 440 с.
2. Примаков С.П.Технологія паперу і картону: Навчальний посібник для вузів / Примаков С.П., Барбаш В.А. – Київ: ЕКМО, 2002. – 396 с.
3. Иванов С.Н. Технология бумаги. Изд. 3-е. – М.: Школа бумаги, 2006. – 696с.
4. Непенин Ю. Н. Технология целлюлозы. Т.2. Производство сульфатной целлюлозы. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 600 с.
5. Примаков С.П. Виробництво сульфатної та органосольвентної целюлози / С.П. Примаков, В. А. Барбаш, Р. І. Черьопкіна. – К.: ЭКМО, 2009. – 280 с.
6. Технология целлюлозно-бумажного производства. Справочные материалы. Том 1. (Часть 2). СПб.: Политехника, 2003. – 633 с.
7. Фляте Д. М. Применение модифицированных наполнителей в производстве бумаги. Целлюлоза, бумага и картон. – 1989. – №17. – С. 36.
8. Курова В. С. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли. Бумаго- и картоноделательные машины. Учебное пособие / В. С. Курова, Н. Н. Кокушкина. – СПб: Политехн. ун-та, 2006. – 589 с.
9. Алексеева А. Н. Планирование на целлюлозно-бумажном предприятии. Часть 2. – Санкт-Петербург: СПбГТУРП, 2009. – 46 с.
10. Современные решения автоматизации / Проспект фирмы “Mesto Automation”, 2015.
11. Consistency Control // Проспект фирмы “Mesto Automation”, 2015.
12. Solutions for superior Results // Проспект фирмы “Honeywell”, 2014.
13. Querprofil-Regelungen. Simply the Best // Проспект фирмы “Honeywell”, 2003.
14. New wave paper IQ // Проспект фирмы “Valmet Automation”, 2001.
15. Konsistenzregelung von A bis Z // Проспект фирмы “BTG”, 2002.
16. Increasing Productivity, Safety & Usability //“Valmet Automation”, 2016.

17. Гринченко И. А. Совершенствование процесса сушки бумаги на бумагоделательной машине с использованием имитационного моделирования : дис. канд. техн. наук : 05.21.03 / Гринченко И. А. – Санкт-Петербург, 2009. – 130 с.
18. Автоматика и автоматизация производственных процессов целлюлозно-бумажных производств. Технологическое проектирование целлюлозно-бумажных предприятий / [Г. П. Буйлов, В. А. Доронин, Н. П. Серебряков и др.]. – М.: Лесная промышленность, 1970. – 224 с.
19. Секушин Н. А. Технологические процессы и производства: Т.38 : самостоятельная работа студентов : методические указания для подготовки дипломированного специалиста по направлению 651900 «Автоматизация и управление», специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств», очной и заочной форм обучения / сост. Н. А. Секушин: Сыкт. лесн. ин-т. – Сыктывкар : СЛИ, 2008. – 48 с.
20. Akesson J. Parameter Optimization of a Paper Machine Model / J. Akesson, J. Ekvall. // Proceedings of Reglermöte, Stockholm. – 2006. – pp. 45–51.
21. Bassily A. Numerical Optimization of the Annual Cost of a Clothes Dryer / A. Bassily, G. Colver. // Drying Technology. – 2005. – №23. – pp. 1515 – 1540.
22. Radha R. Automation of Sectional Drive Paper Machine Using PLC and HMI / R. Radha, V. Basavaraj. // International Journal of Engineering Research and General Science. – 2015. – №3(Issue 4). – pp. 842–847.
23. Slätteke O. Modeling and Control of the Paper Machine Drying Section : PhD Theses. / Slätteke – Department of Automatic Control Lund University Lund, 2006. – 247 p.
24. ГОСТ 53636–2009. Целлюлоза. Бумага Картон. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2011. – 64 с.
25. Жучков П. А. Тепловые процессы в целлюлозно-бумажном производстве / Жучков П. А.– М.: Лесная промышленность, 1978. – 350 с.
26. Бельский А. П. Специальные вопросы тепломассообмена в энергетических и теплотехнологических процессах и установках: учебное пособие. – Изд. 2-е, испр.

- и доп. / А.П. Бельский, В.Ю. Лакомкин– ГОУВПО СПб ГТУ РП. – СПб.: – 2011. – 98 с.: ил. 38.
27. Анашкин А. С. Техническое и программное обеспечение распределенных систем управления / А.С. Анашкин, Э.Д. Кадыров, В.Г. Харазов – СПб.: «П-2», 2004. – 368 с.
28. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
29. Sivill L. Thermodynamic Simulation of Dryer Section Heat Recovery in Paper Machines / L. Sivill, P. Ahtila, M. Taimisto. // Applied Thermal Engineering. – 2005. – №25. – pp. 1273 – 1292.
30. Zhao S. Measurement of Thermal Properties of Paper by a Light Flash Method / S. Zhao, S. Schabel. // Das Papier in ipw. – 2006. – №5. – pp. 34 – 39.
31. Самарский А. А. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд., испр. / А. А. Самарский, А. П. Михайлов – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
32. Цирлин А. М. Оптимальное управление процессами химической технологии: (экстремальные задачи в АСУ) / А. М. Цирлин, В. М. Володин – М.: Химия, 1978. – 382 с.
33. Красников В.В. Кондуктивная сушка / Красников В.В. – Издательство: – М.: Энергия, 1973. – 288 с.
34. Лакомкин В. Ю. Теплотехнический расчет многоцилиндровой сушильной части бумагоделательной машины: методические указания / В. Ю. Лакомкин, А. П. Бельский – ГОУВПО СПб ГТУ РП. – СПб.:– 2006. – 230 с.
35. Барилевич В.А. Основы термогазодинамики двухфазных потоков и их численное решение: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. – 425 с.
36. Тимофеев О. Н. Конвективный теплообмен при сушке бумаги на многоцилиндровых контактных сушильных установках / О. Н. Тимофеев, А. П. Вельский, В. И. Грачев. – Л.: 1989. – 92 с.
37. Кротенко Т. Н. Математическая модель процесса сушки расплывенных капиллярно-пористых тел при пониженном давлении / Т. Н. Кротенко, А. И. Русецкий // Вестн. Харьк. нац. ун-та ; сер. «Математическое моделирование.

- Информационные технологии. Автоматизированные системы управления». – 2007. – № 780. – С. 130 – 142.
38. Sherwood T. K. Mass transfer / Sherwood. – New-York: McGraw-Hill, 1975. – 240 p.
39. Lewis W. K. The evaporation of a liquid into a gas / W. K. Lewis // Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. – 1922. – 325 p.
40. Viitamäki P. Hybrid modeling of paper machine grade changes : PhD Theses. / Viitamäki – Department of Automation and Systems Technology, Helsinki University of Technology, Finland, 2004. – 122 p.
41. Roonprasang K. Thermal Analysis of Multicylinder Drying Section in Paper Making Machines / K. Roonprasang, J. Majschak. // Tagungsband: Verarbeitungsmaschinen und Verarbeitungstechnik Dresden (VVD 2006). – 2006. – pp. 557–573.
42. Modeling of the Drying Process in Paper Plants / K. Yeo, K. Hwang, Y. Chul, H. Kang. // Korean J. Chem. Eng.. – 2004. – №21(4). – pp. 761 – 766.
43. Кулінченко В. Р. Тепловіддача з елементами масообміну (теорія і практика процесу) : підручник / В. Р. Кулінченко, О. Ю. Шевченко, В. А. Піддубний. – К.: Фенікс, 2014. – 918 с.
44. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
45. Техническая термодинамика. Под. ред. В. И. Крутова. Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1971 – 472 с.
46. Жучков П. А. Тепловой и гидравлический режимы бумагоделательных и картоноделательных машин / П. А. Жучков, В. И. Саунин. – М.: Лесная промышленность, 1972. – 152 с.
47. Кубрак А. І. Числові методи. Алгоритми і програми: [навч. посіб.] / Кубрак А. І., Жученко А. І., Ситніков О. В.; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – К.: Політехніка, 2013. – 389 с.
48. Александрова А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / А. А. Александрова, К. А. Орлов, В. Ф. Очков. – М: Издательство МЭИ, 2009. –

224 с.

49. Тернер Д. Вероятность, статистика и исследование операций / Тернер Д. – М.: Статистика, 1976. – 431 с.
50. Himmelblau D. Process analysis with statistical methods / Himmelblau. – New-York: Wiley, 1968. – 460 p.
51. Математическая статистика / Под ред. А. М. Длина. – М.: Высшая школа, 1975. – 398 с.
52. Горонескуль М. М. Таблиці функцій та критичних точок розподілів / М. М. Горонескуль. – Харків: УЦЗУ, 2009. – 90 с.
53. Nelson D. Optimizing paper machine control - a case study / D. Nelson, T. Gardner. // Pulp and Paper Canada. – 1996. – №97(11). – pp. 43 – 49.
54. Wilhelmsson B. An experimental and theoretical study of multi-cylinder paper drying : PhD Theses. / Wilhelmsson – Department of Chemical Engineering, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1995. – 164 p.
55. On identification and control tuning of cylinder dryers / O.Slätteke, K. Forsman, T. Hägglund, B. Wittenmark. // In Proceedings Control Systems 2002. – 2002. – pp. 298 – 302.
56. Ghosh A. K. Optimization of paper machine dryer section / A. K. Ghosh // Proc. of 7th Int. Conf. on Pulp, Paper and Conversion Ind., New Delhi. – 2005. – pp. 45 – 49.
57. Slätteke O. Modeling of a steam heated rotating cylinder – a grey-box approach / O. Slätteke, K. Åström. // American Control Conference 2005. – 2005. – pp. 410 – 414.
58. Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning / Skogestad. // Journal of Process control. – 2003. – №12. – pp. 291 – 309.
59. Talja R. Some aspects of the combined contact-impingement drying of paper / R. Talja, O. Timofeev, J. Keränen, N. Milosavljevic // Int. State-of-the-Art Conf. «Resource- and energy saving in the pulp and paper industry and municipal economy (process, equipment, automation)». – SPb : State Technological University of Plant Polymers, 2005. – pp. 237 – 242.
60. Perré P. Modelling of paper drying: a comprehensive computational model used by the industry / P. Perré, Y. Lescanne, Y. Brocard. // Proceedings of the 14th

International Drying Symposium (IDS'2004). – 2004. – pp. 1263 – 1270.

61. ГОСТ 9094-89. Бумага для печати офсетная. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1989. – 12 с.

62. Фляте Д. М. Свойства бумаги. Издание 3-е / Д. М. Фляте. / – М.: Лесная промышленность, 1986. – 680 с.

63. Соловьева Р. А. Математические модели для показателей качества в производстве тарного картона / Т. М. Жданова, Т. А. Гришко, М. Р. Сафонова, И. В. Бондаренкова, Т. И. Четверкина // Бумажная промышленность. – 1987. – № 9. – С. 105 – 114.

64. Камышев А. С. Контроль качества печатной продукции // Computer Art. – 2002. – № 7. – С. 31.

65. Робертсон Б. Решение проблем с помощью методов обеспечения качества // Стандарты и качество. – 1999. – № 1. – С. 85 – 89.

66. Кислый В. В. Оценка качества продукции лесной и деревообрабатывающей промышленности / Кислый В. В. – М.: Лесная промышленность, 1975. – 224 с.

67. Терентьев О. А., Куров В. С. Исследование качественных показателей бумажного полотна // Химия и технология бумаги: Межвуз. сб. науч. тр. Л.: ЛТА, 1986. – С. 3 – 6.

68. ГОСТ 9095–89. Бумага для печати типографская. Технические условия. Москва: Издательство стандартов, 1989. – 8 с.

69. ГОСТ 9168–80. Бумага для глубокой печати. Технические условия. Москва: Издательство стандартов, 1987. – 6 с.

70. ГОСТ 7717–88. Бумага диаграммная. Технические условия. Москва: Издательство стандартов, 1989. – 10 с.

71. ГОСТ 7271–74. Бумага для почтовых документов. Технические условия. Москва: Издательство стандартов, 1976. – 4 с.

72. Кунцевич В. М. Синтез оптимальных и адаптивных систем управления: Игровой подход / В. М. Кунцевич, М. М. Лычак. – Киев: Наукова думка, 1985. – 247 с.

73. Жученко А. І. Обмеження на параметри якості при побудові температурного графіка прогрівання паперового полотна. Жученко А.І., Черьопкін Є.С.Тези доповідей науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – 2014; Київ, НТУУ «КПІ», 10 листопада. – К: НТУУ «КПІ». – 2014. – 85с.
74. Кубрак А. І. Комп'ютерне моделювання та ідентифікація автоматичних систем : [Навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за напрямом "Автоматизація та комп'ютер.-інтегр. технології]/ А. І. Кубрак, А. І. Жученко, М. З. Кваско; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – К.: Політехніка, 2004. – 424 с. – Бібліогр.: с. 409 – 416.
75. Жученко А. И., Черёпкин Е. С. Расчёт прогрева бумажного полотна. Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – К.: НТУУ «КПІ». – 2014. –№2 (13). – С. 104 – 110.
76. Жученко А. І. Спеціальні розділи математики для дослідження комп'ютерних систем: Навч. посіб. / Жученко А. І., Ярощук Л. Д. – К.: ІВЦ «Видавництво “Політехніка”», 2002. – 208 с.
77. Жученко А. И., Черёпкин Е. С. Постановка задачи оптимального управления процессом прогрева бумажного полотна в сушильной части бумагоделательной машины. Автоматизация промышленных і бизнес процесів. – Одеса: 2015 – № 22. – С. 25 – 31.
78. Голінко І. М. Моделювання та оптимізація систем керування: монографія / І.М. Голінко, А.І. Кубрак. – Кам'янець-Подільський: ПП Буйницький, 2012. – 262 с. – ISBN 978-617-608-034-3.
79. Щокін В. П. Моделювання складних процесів та систем в галузі автоматизації з використанням сучасних інформаційних технологій: монографія / Щокін В. П., Голіков С. П., Кваско М. З., Чорний С. Г. – К.: Центр учбової літератури, 2012. – 216 с. – ISBN 978-611-01-0360-2.
80. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / [ пер. с англ. Б.И. Копылова / Дорф Р., Бишоп Р. ]– М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.

81. LabVIEW user manual. National Instruments corp. – Austin, Taxes, 2014. – 310 p.
82. Патрахин В. А. Особенности реализации алгоритмов регулирования библиотеки PID Control LabVIEW / В. А. Патрахин, М. А. Кравец. // Пикард. – 2003. – №3. – С. 26 – 30.
83. Патент України на корисну модель UA 107812 МПК (2016.01) D21F 5/00 G01K 13/00. Прилад для вимірювання температури стінки сушильного циліндра / А. І. Жученко, Є. С. Черьопкін. Опубл. 24.06.2016. –Бюл. № 12. – 3с.
84. Жученко А. І. Реалізація алгоритму розрахунку прогрівання паперового полотна. /Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – К.: НТУУ «КПІ». –2015. – №1 (13). – С. 88 – 91.

## ДОДАТОК А

Результати математичного моделювання процесу прогрівання паперового полотна (температура паперового полотна на виході із сушильних циліндрів та ділянок вільного руху)

Таблиця А.1 – Результати математичного моделювання для 1 і 2 сушильних циліндрів

Дослід	1сц		1вр		2сц		2вр	
	мод	екс	мод	екс	мод	екс	мод	екс
1	40.34	40.29	34.20	33.99	47.76	47.88	42.05	42.09
2	40.94	40.94	34.21	34.27	47.12	47.22	42.54	42.60
3	39.68	39.43	34.94	34.94	47.50	47.41	42.16	42.35
4	39.42	39.77	34.86	34.56	47.09	47.26	43.03	42.90
5	40.22	40.06	34.43	34.72	47.89	47.89	42.27	42.45
6	39.32	39.45	34.78	34.78	47.40	47.49	41.66	41.61
7	40.63	40.95	34.63	34.37	47.38	47.41	42.89	42.97
8	40.05	40.06	34.73	35.06	47.94	47.92	42.28	42.13
9	39.82	40.04	34.72	34.53	47.79	47.69	41.51	41.42
10	40.20	39.98	34.58	34.53	47.88	47.73	42.31	42.38
11	40.00	40.37	35.04	34.97	47.68	47.66	42.55	42.35
12	40.85	40.71	34.84	35.09	47.48	47.49	42.36	42.15
13	39.67	39.63	35.09	35.43	47.93	47.93	42.28	42.20
14	39.55	39.46	34.53	34.37	47.16	47.25	42.10	42.28
15	39.89	39.59	35.10	35.28	47.15	47.07	41.84	42.04
16	39.97	40.05	35.01	34.85	47.27	47.12	42.89	42.95
17	40.70	40.94	34.36	34.16	47.07	47.22	42.30	42.34
18	39.70	39.32	34.85	34.70	47.64	47.73	42.83	42.78
19	40.67	40.61	34.74	34.54	47.38	47.37	42.31	42.42
20	40.54	40.56	34.72	34.84	47.19	47.26	41.68	41.88
21	40.32	40.06	34.68	34.46	47.54	47.40	42.46	42.40
22	40.12	40.34	34.06	34.23	47.66	47.81	42.23	42.32
23	39.85	39.94	34.48	34.27	47.32	47.21	41.54	41.68
24	39.80	39.81	34.28	33.97	47.76	47.94	41.65	41.71
25	39.75	40.00	34.66	34.58	46.98	46.80	42.31	42.27
26	39.40	39.50	35.41	35.39	47.81	47.71	42.23	42.36
27	40.24	40.21	34.48	34.15	47.26	47.41	42.56	42.56
28	40.47	40.54	34.19	34.36	47.38	47.22	41.64	41.51
29	40.65	40.61	33.97	33.63	47.74	47.83	42.22	42.20
30	40.39	40.32	35.27	35.20	47.57	47.61	42.17	42.17
31	40.44	40.44	33.99	34.07	47.77	47.89	41.83	41.89
32	40.16	40.30	35.21	35.55	47.92	47.88	42.68	42.53

Продовження таблиці А.1

Дослід	1сц		1вр		2сц		2вр	
	мод	екс	мод	екс	мод	екс	мод	екс
33	40.37	40.04	34.59	34.33	47.64	47.83	41.84	41.77
34	40.38	40.17	35.32	35.11	47.40	47.59	42.10	42.03
35	40.00	39.60	35.14	34.98	47.69	47.50	41.56	41.75
36	40.07	39.70	35.04	35.06	47.34	47.50	42.03	42.05
37	40.82	40.46	34.77	34.51	47.24	47.17	42.85	43.01
38	40.26	40.49	33.87	33.72	47.47	47.52	42.67	42.62
39	40.25	40.29	33.94	34.16	47.46	47.65	41.76	41.72
40	40.28	40.11	34.16	34.40	47.11	47.24	42.47	42.49
41	39.60	39.25	35.08	35.17	47.01	46.78	42.42	42.25
42	39.45	39.29	34.17	34.13	47.12	47.26	42.48	42.55
43	40.58	40.62	35.25	35.11	47.23	47.02	41.61	41.73
44	40.32	40.72	34.26	34.09	47.57	47.40	42.22	42.28
45	40.60	40.22	35.08	35.27	47.47	47.65	42.02	42.03
46	39.34	39.22	35.16	34.97	47.84	47.66	42.64	42.62
47	39.88	40.12	34.53	34.31	47.69	47.58	41.94	42.07
48	40.57	40.18	34.47	34.78	47.12	47.16	42.00	42.01
49	39.37	39.14	34.46	34.72	47.68	47.54	42.56	42.68
50	40.37	40.58	33.85	33.99	47.62	47.66	41.92	41.82
51	40.65	40.66	35.04	35.28	47.00	47.19	42.39	42.26
52	40.57	40.39	34.27	34.56	47.30	47.39	41.84	41.63
53	40.61	40.36	34.90	34.63	47.77	47.90	41.77	41.88
54	39.74	40.11	35.29	35.28	47.03	46.98	42.47	42.43
55	39.72	39.83	34.13	34.19	47.70	47.80	42.80	42.77
56	40.55	40.78	35.12	34.98	48.00	47.79	42.22	42.22
57	40.02	40.38	34.29	34.33	48.11	48.27	41.54	41.74
58	39.54	39.94	34.94	35.09	47.68	47.53	42.80	42.95
59	40.30	40.55	34.47	34.46	48.50	48.73	41.62	41.79
60	40.78	41.15	34.89	34.96	48.26	48.49	42.03	42.03
61	39.40	39.70	34.68	34.83	47.82	47.92	42.30	42.14
62	40.56	40.72	34.14	34.19	48.01	47.81	41.87	42.06
63	39.52	39.73	33.80	33.71	48.20	47.98	42.28	42.36
64	40.33	39.96	35.07	35.08	48.46	48.63	42.04	42.21
65	40.17	40.29	34.77	35.10	47.63	47.50	42.55	42.58
66	40.96	41.34	33.82	34.10	47.94	47.99	41.91	42.04
67	39.73	39.56	34.17	34.46	48.26	48.24	41.70	41.85
68	40.07	40.36	34.51	34.48	48.04	48.15	41.93	42.03
69	40.69	40.61	35.02	35.12	47.75	47.88	42.40	42.23
70	40.80	41.09	34.70	34.70	47.85	47.66	42.77	42.87
71	40.27	40.12	34.84	34.98	47.85	47.81	42.39	42.39

Закінчення таблиці А.1

Дослід	1сц		1вр		2сц		2вр	
	мод	екс	мод	екс	мод	екс	мод	екс
72	40.37	40.01	34.84	34.81	48.01	47.85	42.17	42.22
73	40.01	39.78	34.40	34.56	48.35	48.53	42.38	42.44
74	39.90	40.20	35.01	34.80	48.08	47.97	42.55	42.64
75	40.31	39.97	35.12	35.41	48.31	48.52	41.65	41.44
76	39.53	39.88	33.98	34.11	48.29	48.37	42.62	42.68
77	40.39	40.69	35.17	35.12	48.21	48.20	42.54	42.71
78	39.52	39.60	34.51	34.78	48.35	48.49	41.91	41.80
79	40.11	40.17	34.68	34.47	48.02	48.25	41.99	41.91
80	39.83	40.19	34.87	34.88	48.02	47.96	43.00	43.19
81	40.61	40.74	34.80	34.74	47.77	47.70	41.99	42.18

Таблиця А. 2 – Результати математичного моделювання для 3 і 4 сушильних циліндрів

Дослід	3сц		3вр		4сц		4вр	
	мод	екс	мод	екс	мод	екс	мод	екс
1	55.95	56.07	50.68	50.88	65.09	65.20	54.77	54.74
2	56.21	56.40	50.25	50.16	65.41	65.62	54.51	54.37
3	55.78	55.68	50.50	50.40	65.57	65.82	54.65	54.82
4	56.03	55.91	50.23	50.46	65.29	65.61	54.48	54.68
5	55.75	55.92	50.75	50.58	65.45	65.23	54.80	54.92
6	56.29	56.44	50.43	50.63	65.26	65.57	54.59	54.62
7	55.95	56.21	50.41	50.25	65.61	65.64	54.58	54.47
8	55.93	55.81	50.77	50.53	65.39	65.36	54.80	54.74
9	56.30	56.22	50.67	50.81	65.37	65.38	54.73	54.59
10	56.20	55.96	50.73	50.59	65.61	65.42	54.76	54.64
11	56.26	56.39	50.59	50.60	65.53	65.35	54.67	54.67
12	56.12	56.23	50.46	50.61	65.57	65.38	54.59	54.63
13	55.98	56.21	50.75	50.79	65.47	65.18	54.76	54.85
14	56.28	56.14	50.24	50.26	65.38	65.23	54.45	54.50
15	55.76	55.82	50.22	50.01	65.57	65.70	54.44	54.34
16	55.75	55.67	50.30	50.35	65.23	65.36	54.48	54.57
17	55.83	56.03	50.17	50.32	65.21	65.06	54.40	54.54
18	55.69	55.57	50.54	50.33	65.26	65.52	54.62	54.73
19	56.07	56.00	50.36	50.32	65.17	65.00	54.51	54.51
20	55.88	55.72	50.23	50.27	65.41	65.16	54.43	54.36
21	55.75	55.54	50.46	50.63	65.29	65.32	54.56	54.32
22	55.98	56.20	50.54	50.31	65.20	65.17	54.60	54.82
23	56.07	55.96	50.31	50.29	65.34	65.12	54.46	54.20

## Продовження таблиці А.2

Дослід	3сц		3вр		4сц		4вр	
	мод	екс	мод	екс	мод	екс	мод	екс
24	55.83	55.93	50.59	50.68	65.39	65.66	54.63	54.40
25	56.12	55.91	50.08	50.09	65.24	65.29	54.31	54.31
26	55.59	55.50	50.62	50.73	65.42	65.45	54.64	54.66
27	56.15	56.25	50.25	50.06	65.07	65.00	54.41	54.46
28	55.77	56.00	50.33	50.37	65.43	65.24	54.45	54.63
29	55.86	55.80	50.56	50.43	65.18	65.34	54.67	54.91
30	56.09	56.37	50.53	50.50	65.23	65.23	54.65	54.74
31	56.06	56.00	50.66	50.68	65.47	65.73	54.72	54.85
32	56.19	55.99	50.75	50.79	65.44	65.43	54.77	54.61
33	56.28	56.08	50.34	50.27	65.53	65.63	54.52	54.37
34	55.87	56.04	50.51	50.54	65.58	65.69	54.62	54.66
35	56.04	56.13	50.63	50.59	65.31	65.21	54.69	54.89
36	56.16	56.18	50.46	50.35	65.42	65.69	54.58	54.81
37	55.99	56.06	50.47	50.54	65.49	65.38	54.58	54.74
38	55.99	55.85	50.54	50.68	65.37	65.11	54.62	54.45
39	56.07	56.25	50.38	50.36	65.37	65.66	54.52	54.54
40	55.91	55.89	50.57	50.38	65.42	65.50	54.63	54.89
41	56.10	55.82	50.34	50.49	65.31	65.27	54.49	54.63
42	55.86	55.95	50.27	50.28	65.43	65.19	54.44	54.52
43	55.79	56.02	50.42	50.36	65.27	65.49	54.53	54.45
44	55.94	55.87	50.40	50.41	65.22	65.16	54.52	54.32
45	55.93	55.97	50.17	50.13	65.31	65.09	54.37	54.54
46	55.69	55.83	50.11	50.25	65.30	65.18	54.33	54.14
47	55.63	55.65	50.18	50.38	65.14	65.20	54.37	54.31
48	55.70	55.86	50.25	50.39	65.09	65.42	54.41	54.24
49	55.77	55.88	50.47	50.43	65.14	64.83	54.54	54.30
50	56.00	56.26	50.40	50.40	65.18	65.15	54.49	54.73
51	55.92	55.97	50.64	50.66	65.32	65.52	54.63	54.73
52	56.17	56.02	50.54	50.32	65.27	65.02	54.57	54.36
53	56.07	55.82	50.16	50.35	65.43	65.15	54.33	54.12
54	55.68	55.64	50.52	50.68	65.36	65.63	54.55	54.57
55	56.05	56.07	50.48	50.62	65.10	64.90	54.52	54.66
56	56.01	55.79	50.08	49.90	65.34	65.59	54.28	54.49
57	55.60	55.43	50.27	50.32	65.31	65.48	54.39	54.43
58	55.79	55.96	50.58	50.81	65.03	65.16	54.57	54.82
59	56.11	56.23	50.09	50.28	65.16	65.32	54.69	54.45
60	55.61	55.34	50.98	50.74	65.36	65.54	55.23	55.36
61	56.52	56.72	51.18	51.01	65.50	65.26	55.34	55.14
62	56.72	56.47	51.24	51.20	66.09	65.96	55.38	55.38
63	56.79	56.66	50.96	51.08	66.21	65.93	55.21	54.95

## Закінчення таблиці А.2

Дослід	3сц		3вр		4сц		4вр	
	мод	екс	мод	екс	мод	екс	мод	екс
64	56.50	56.22	51.49	51.68	66.25	65.95	55.52	55.32
65	57.04	57.19	51.33	51.58	66.06	66.35	55.42	55.27
66	56.88	56.66	51.04	51.16	66.41	66.58	55.24	55.19
67	56.58	56.40	51.16	51.06	66.30	66.38	55.31	55.58
68	56.71	56.70	51.28	51.04	66.10	65.96	55.38	55.55
69	56.83	56.81	51.45	51.33	66.18	66.06	55.48	55.34
70	57.00	56.97	50.90	51.04	66.25	66.22	55.14	55.19
71	56.44	56.18	51.10	50.98	66.36	66.30	55.26	55.01
72	56.64	56.80	51.31	51.08	65.99	66.17	55.38	55.17
73	56.85	57.13	51.16	51.26	66.12	66.42	55.29	55.11
74	56.70	56.60	50.96	50.81	66.25	66.39	55.16	55.38
75	56.50	56.64	51.03	50.90	66.15	65.91	55.20	54.98
76	56.57	56.61	51.02	50.99	66.01	66.22	55.19	54.94
77	56.56	56.79	51.12	51.19	66.05	66.37	55.25	55.07
78	56.66	56.69	51.34	51.32	66.05	65.83	55.38	55.27
79	56.89	57.00	51.16	51.06	66.11	65.79	55.27	55.31
80	56.70	56.45	51.31	51.46	66.25	65.93	55.35	55.29
81	56.86	56.64	51.29	51.39	66.13	66.10	55.34	55.46
82	56.84	57.01	51.23	51.17	66.22	66.25	55.30	55.20
83	56.78	56.81	51.33	51.12	66.20	66.15	55.35	55.32
84	56.87	56.72	51.11	50.98	66.16	66.12	55.21	55.04
85	56.65	56.52	51.10	51.08	66.22	66.48	55.21	55.28
86	56.64	56.79	50.94	50.79	66.07	65.81	55.10	55.33

Таблиця А. 3 Результати математичного моделювання для 5 і 6 сушильних циліндрів

Дослід	5сц		5вр		6сц		6вр	
	мод	екс	мод	екс	мод	екс	мод	екс
1	73.87	73.99	62.37	62.13	83.58	83.84	65.33	65.58
2	73.89	74.21	62.46	62.23	83.72	83.49	65.42	65.55
3	74.09	74.31	62.32	62.60	83.73	83.31	65.47	65.76
4	74.19	74.55	62.40	62.70	83.84	83.44	65.38	65.38
5	74.03	73.78	62.31	62.28	83.89	83.56	65.42	65.33
6	74.13	74.26	62.50	62.35	83.79	84.16	65.37	65.51
7	74.02	74.28	62.38	62.17	83.84	84.13	65.46	65.58
8	74.23	74.56	62.38	62.45	83.77	83.53	65.40	65.58
9	74.10	73.95	62.51	62.35	83.89	84.18	65.39	65.41
10	74.10	74.02	62.48	62.17	83.81	83.62	65.46	65.58

## Продовження таблиці А.3

Дослід	5сц		5вр		бсц		бвр	
	мод	екс	мод	екс	мод	екс	мод	екс
11	74.25	74.18	62.50	62.77	83.80	83.65	65.43	65.32
12	74.21	74.01	62.45	62.63	83.88	83.46	65.44	65.61
13	74.23	73.92	62.41	62.36	83.85	83.84	65.41	65.44
14	74.18	74.17	62.51	62.29	83.86	83.54	65.38	65.25
15	74.13	74.14	62.33	62.08	83.82	83.88	65.43	65.42
16	74.25	74.30	62.33	62.17	83.79	83.55	65.33	65.36
17	74.04	73.91	62.36	62.23	83.85	83.65	65.32	65.01
18	74.04	73.80	62.31	62.08	83.73	83.88	65.33	65.43
19	74.07	73.78	62.45	62.66	83.72	84.11	65.30	65.12
20	74.02	74.17	62.38	62.43	83.73	83.94	65.37	65.44
21	74.17	74.09	62.34	62.65	83.70	83.72	65.33	65.30
22	74.10	73.96	62.42	62.32	83.78	83.95	65.31	65.13
23	74.05	73.84	62.45	62.19	83.73	83.72	65.35	65.58
24	74.15	74.40	62.37	62.68	83.70	83.66	65.36	65.49
25	74.18	74.28	62.48	62.69	83.75	83.44	65.31	65.08
26	74.09	74.16	62.29	62.16	83.76	83.81	65.36	65.58
27	74.21	74.32	62.49	62.51	83.70	83.51	65.26	65.10
28	74.00	74.25	62.36	62.25	83.76	83.40	65.37	65.30
29	74.22	73.96	62.47	62.22	83.65	83.93	65.36	65.34
30	74.08	74.24	62.60	62.64	83.77	84.08	65.41	65.71
31	74.20	73.96	62.59	62.42	83.77	83.53	65.48	65.21
32	74.35	74.59	62.64	62.91	83.83	83.90	65.47	65.53
33	74.33	74.64	62.66	62.40	83.91	83.98	65.49	65.27
34	74.39	74.75	62.52	62.42	83.90	83.83	65.50	65.65
35	74.42	74.63	62.58	62.68	83.93	84.34	65.42	65.10
36	74.26	74.07	62.62	62.43	83.94	84.04	65.45	65.37
37	74.33	74.58	62.56	62.38	83.83	83.95	65.47	65.59
38	74.37	74.30	62.57	62.46	83.87	83.49	65.43	65.48
39	74.31	73.99	62.60	62.54	83.89	83.54	65.43	65.32
40	74.31	74.43	62.54	62.29	83.85	83.53	65.44	65.73
41	74.35	74.08	62.61	62.41	83.84	83.68	65.40	65.56
42	74.28	74.18	62.53	62.30	83.86	83.82	65.44	65.28
43	74.36	74.03	62.51	62.43	83.82	83.73	65.39	65.08
44	74.27	74.29	62.56	62.83	83.86	84.13	65.37	65.41
45	74.24	74.23	62.56	62.82	83.80	83.95	65.39	65.67
46	74.31	74.59	62.48	62.64	83.77	83.96	65.39	65.48
47	74.30	74.56	62.46	62.72	83.80	83.92	65.35	65.51
48	74.21	74.16	62.49	62.35	83.80	83.61	65.34	65.02
49	74.19	74.28	62.51	62.28	83.75	83.50	65.36	65.17
50	74.22	74.18	62.59	62.37	83.74	84.00	65.37	65.53

## Закінчення таблиці А.3

Дослід	5сц		5вр		бсц		бвр	
	мод	екс	мод	екс	мод	екс	мод	екс
51	74.25	74.55	62.57	62.63	83.76	83.91	65.41	65.35
52	74.34	74.37	62.65	62.87	83.77	83.46	65.39	65.58
53	74.31	74.44	62.61	62.68	83.82	83.55	65.43	65.47
54	74.40	74.59	62.48	62.61	83.80	83.95	65.40	65.56
55	74.36	74.11	62.61	62.61	83.84	83.53	65.33	65.29
56	74.21	74.30	62.60	62.73	83.82	83.65	65.40	65.39
57	74.36	74.19	62.46	62.27	83.73	83.36	65.39	65.20
58	74.35	74.11	62.53	62.30	83.81	84.09	65.32	65.12
59	74.19	74.03	63.04	62.81	83.80	83.56	65.74	65.99
60	74.26	73.97	63.11	62.89	83.71	84.05	66.02	66.32
61	74.85	75.10	63.42	63.17	84.22	84.46	66.05	65.81
62	74.93	75.21	63.48	63.54	84.56	84.60	66.21	65.95
63	75.28	75.27	63.50	63.53	84.60	85.01	66.24	65.92
64	75.35	75.65	63.39	63.11	84.80	84.45	66.25	65.96
65	75.37	75.15	63.57	63.77	84.84	84.96	66.18	65.89
66	75.25	75.10	63.51	63.80	84.84	84.83	66.28	66.38
67	75.45	75.36	63.40	63.15	84.76	84.93	66.24	66.46
68	75.38	75.03	63.43	63.30	84.88	84.50	66.17	66.40
69	75.26	75.59	63.47	63.27	84.83	85.24	66.19	66.27
70	75.30	75.07	63.52	63.75	84.75	84.47	66.20	66.49
71	75.34	75.16	63.32	63.37	84.77	84.40	66.23	66.32
72	75.40	75.75	63.38	63.68	84.79	84.50	66.11	66.23
73	75.17	74.89	63.45	63.63	84.82	84.41	66.14	66.14
74	75.24	75.38	63.39	63.24	84.68	84.52	66.17	66.33
75	75.32	75.16	63.31	63.61	84.71	85.10	66.13	65.82
76	75.25	75.22	63.33	63.36	84.75	84.52	66.09	66.15
77	75.16	75.18	63.32	63.18	84.71	84.97	66.09	66.32
78	75.18	74.91	63.35	63.53	84.65	84.53	66.08	66.15
79	75.17	75.15	63.42	63.15	84.65	84.82	66.09	66.38
80	75.20	75.10	63.35	63.63	84.64	84.55	66.13	66.22
81	75.28	75.24	63.39	63.48	84.65	84.51	66.08	65.93
82	75.20	75.08	63.38	63.19	84.70	84.70	66.10	65.87
83	75.25	75.24	63.35	63.51	84.64	84.43	66.09	65.76
84	75.24	74.92	63.38	63.11	84.67	84.93	66.07	66.10
85	75.21	75.02	63.29	63.46	84.65	84.84	66.08	66.07
86	75.24	75.03	63.28	63.42	84.63	84.64	66.03	65.78

Таблиця А. 4 – Результати математичного моделювання для 7 і 8 сушильних циліндрів

Дослід	7сц		7вр		8сц		8вр	
	мод	екс	мод	екс	мод	екс	мод	екс
1	89.47	89.62	70.08	69.74	95.63	95.21	75.00	74.80
2	89.55	89.83	70.14	69.99	95.75	95.91	75.04	74.70
3	89.63	89.99	70.15	70.48	95.80	95.59	75.07	74.87
4	89.64	89.97	70.20	70.08	95.85	95.51	75.08	75.28
5	89.71	89.76	70.23	70.53	95.86	95.80	75.11	74.99
6	89.74	89.96	70.18	70.32	95.89	95.58	75.13	75.26
7	89.69	89.55	70.21	70.06	95.91	96.04	75.11	75.46
8	89.72	89.30	70.18	70.48	95.89	96.17	75.12	75.23
9	89.68	90.11	70.24	70.41	95.91	95.53	75.11	75.05
10	89.75	90.01	70.20	70.49	95.89	95.80	75.14	74.96
11	89.71	90.09	70.20	70.04	95.93	95.69	75.12	74.96
12	89.71	89.57	70.24	70.12	95.91	96.21	75.13	75.04
13	89.76	89.36	70.23	70.30	95.92	96.03	75.15	74.78
14	89.74	89.99	70.24	70.40	95.94	96.04	75.15	74.97
15	89.75	90.18	70.22	70.15	95.94	95.84	75.15	74.81
16	89.74	89.78	70.21	70.24	95.95	95.78	75.15	75.37
17	89.72	90.10	70.24	70.07	95.94	95.56	75.14	75.15
18	89.76	89.99	70.19	70.08	95.94	95.94	75.16	75.35
19	89.69	89.30	70.19	70.13	95.96	96.32	75.14	75.33
20	89.69	90.09	70.19	70.14	95.93	95.98	75.14	74.91
21	89.70	89.71	70.18	70.43	95.93	96.07	75.14	74.79
22	89.69	89.65	70.22	70.28	95.94	96.32	75.14	74.88
23	89.73	89.78	70.20	70.23	95.93	95.64	75.16	74.81
24	89.71	90.15	70.19	70.13	95.96	96.43	75.15	75.05
25	89.70	89.52	70.21	69.89	95.95	95.48	75.15	75.40
26	89.73	90.00	70.22	70.29	95.95	95.50	75.17	75.43
27	89.74	89.90	70.20	70.33	95.97	95.93	75.17	75.37
28	89.71	89.84	70.23	70.05	95.97	95.70	75.16	74.91
29	89.75	89.44	70.18	70.50	95.96	96.26	75.18	75.46
30	89.68	89.98	70.31	70.29	95.98	95.97	75.22	75.41
31	89.84	89.42	70.31	70.33	96.04	96.43	75.29	75.65
32	89.84	89.66	70.34	70.34	96.13	96.52	75.30	74.98
33	89.88	89.53	70.38	70.14	96.13	96.13	75.31	75.42
34	89.93	89.96	70.37	70.60	96.16	96.18	75.34	75.14
35	89.93	89.97	70.39	70.14	96.18	95.87	75.34	75.57
36	89.94	89.80	70.40	70.36	96.18	95.82	75.35	75.24
37	89.95	90.24	70.35	70.08	96.20	95.89	75.35	75.25
38	89.90	89.51	70.37	70.06	96.21	96.15	75.33	75.38

Продовження таблиці А.4

Дослід	7сц		7вр		8сц		8вр	
	мод	екс	мод	екс	мод	екс	мод	екс
39	89.92	89.93	70.38	70.24	96.18	96.17	75.35	75.20
40	89.94	90.33	70.37	70.44	96.20	95.81	75.35	75.37
41	89.92	90.24	70.37	70.60	96.21	95.78	75.35	75.61
42	89.92	89.79	70.38	70.19	96.20	95.80	75.35	75.32
43	89.93	90.14	70.36	70.01	96.20	96.09	75.36	75.62
44	89.91	90.17	70.38	70.36	96.21	96.09	75.35	75.34
45	89.93	90.36	70.36	70.38	96.20	95.81	75.36	75.72
46	89.90	90.26	70.35	70.53	96.22	95.76	75.35	75.15
47	89.90	89.46	70.37	70.13	96.21	96.30	75.35	75.49
48	89.92	90.14	70.37	70.64	96.20	95.82	75.36	74.99
49	89.92	90.17	70.35	70.36	96.22	95.96	75.36	75.21
50	89.89	90.02	70.35	70.53	96.22	95.98	75.36	74.99
51	89.89	89.61	70.36	70.70	96.21	96.58	75.36	75.50
52	89.91	90.30	70.36	70.48	96.21	95.78	75.37	75.53
53	89.91	90.04	70.39	70.38	96.22	96.69	75.37	75.14
54	89.94	89.80	70.38	70.30	96.23	95.86	75.39	75.32
55	89.94	89.76	70.41	70.09	96.25	96.01	75.39	75.62
56	89.96	89.93	70.40	70.42	96.25	96.58	75.40	75.75
57	89.95	90.30	70.36	70.43	96.27	96.32	75.40	75.10
58	89.91	89.66	70.40	70.72	96.26	95.92	75.38	75.53
59	89.96	90.11	70.40	70.67	96.24	95.83	75.40	75.09
60	89.95	90.33	70.73	70.65	96.27	96.56	75.77	76.04
61	90.37	90.39	70.96	71.04	96.74	96.81	75.94	75.76
62	90.66	90.33	71.11	71.31	96.96	96.49	76.07	76.07
63	90.85	91.12	71.13	71.37	97.12	96.90	76.15	76.17
64	90.87	91.25	71.22	71.10	97.22	96.89	76.16	76.54
65	90.98	91.00	71.24	71.41	97.24	97.57	76.21	75.91
66	91.01	90.95	71.24	70.97	97.30	96.99	76.22	76.51
67	91.01	91.11	71.21	71.45	97.32	97.10	76.22	76.48
68	90.97	91.28	71.27	71.08	97.32	97.63	76.21	76.38
69	91.04	91.40	71.25	71.23	97.30	97.18	76.24	76.13
70	91.01	90.95	71.22	71.13	97.34	97.06	76.23	76.05
71	90.97	90.88	71.23	71.31	97.33	97.33	76.22	76.03
72	90.99	91.17	71.24	71.22	97.31	97.46	76.23	76.08
73	91.00	90.71	71.25	71.25	97.32	97.02	76.23	76.45
74	91.02	91.31	71.19	70.85	97.33	97.57	76.24	76.43
75	90.95	91.07	71.21	70.91	97.35	97.14	76.21	76.31
76	90.97	91.34	71.23	71.32	97.31	97.14	76.23	76.24
77	90.99	90.66	71.21	71.41	97.32	97.21	76.24	76.29
78	90.97	91.12	71.19	71.14	97.34	97.14	76.23	75.87

## Закінчення таблиці А.4

Дослід	7сц		7вр		8сц		8вр	
	мод	екс	мод	екс		мод	екс	мод
79	90.94	91.36	71.19	70.94	97.33	97.21	76.22	76.54
80	90.95	90.72	71.19	71.10	97.32	97.25	76.23	76.01
81	90.95	90.94	71.20	71.43	97.32	97.01	76.23	76.43
82	90.96	90.68	71.22	70.98	97.33	97.20	76.23	76.44
83	90.98	90.74	71.20	71.26	97.33	97.42	76.25	76.61
84	90.96	91.18	71.21	70.95	97.35	97.42	76.24	75.93
85	90.97	91.03	71.21	71.12	97.34	97.31	76.25	76.17
86	90.97	91.13	71.20	71.50	97.35	97.53	76.25	76.50

## ДОДАТОК Б

## Патент на корисну модель "Прилад для вимірювання температури стінки сушильного циліндра"



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **107812** (13) **U**(51) МПК (2016.01)  
**D21F 5/00**  
**G01K 13/00**

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

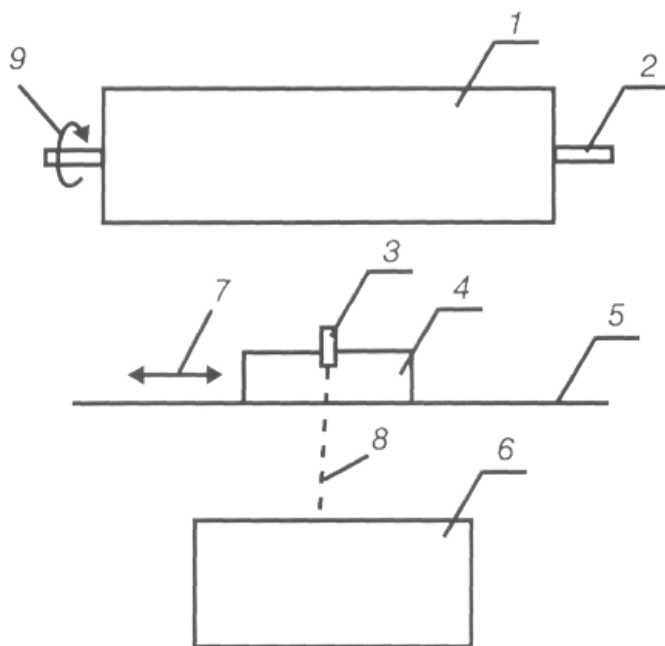
(21) Номер заявки: <b>u 2015 12094</b>	(72) Винахідник(и): <b>Черьопкін Євгеній Сергійович (UA), Жученко Анатолій Іванович (UA)</b>
(22) Дата подання заявки: <b>07.12.2015</b>	(73) Власник(и): <b>НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ", пр. Перемоги, 37, м. Київ-56, 03056 (UA)</b>
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>24.06.2016</b>	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>24.06.2016, Бюл.№ 12</b>	

**(54) ПРИЛАД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ СТІНКИ СУШИЛЬНОГО ЦИЛІНДРА****(57) Реферат:**

Прилад для вимірювання температури стінки сушильного циліндра містить датчик температури, який вмонтовано в торцеву стінку сушильного циліндра, радіочастотний приймач сигналу, канал бездротової передачі інформації від датчика температури до радіочастотного приймача та операторську панель обробки інформації. Як датчик температури використовують пірометр, який розміщено під сушильним циліндром на опорі, яка рухається вздовж осі сушильного циліндра, а радіочастотний приймач інтегровано в операторську панель обробки інформації.

**UA 107812 U**

UA 107812 U



Фиг.

## UA 107812 U

Корисна модель належить до целюлозно-паперової промисловості та призначена для використання на машинах з виробництва паперу для вимірювання температури сушильних циліндрів.

5 Відомий прилад для вимірювання температури сушильних циліндрів, що складається з термоопору (датчика), вмонтованого в конденсатопровід та з'єднаного з логометром. Проходячи по конденсатопроводу, конденсат, температура якого дорівнює температурі циліндра, омиває датчик. Внаслідок цього в датчику виникає опір, який фіксується сполученим з ним логометром. В разі зміни температури конденсату змінюється опір датчика і, отже, показники логометра [1].

10 Недоліками відомого приладу є те, що при вимірюванні температури стінки сушильного циліндра неможливо внести поправку на втрати тепла за товщиною шару накипу та стінки самого сушильного циліндра.

15 Найбільш близьким до запропонованої корисної моделі є прилад для вимірювання температури сушильного циліндра, що містить датчик температури, який вмонтовано в торцеву стінку сушильного циліндра, радіочастотний приймач, операторську панель обробки інформації та канал бездротової передачі інформації від датчика до радіочастотного приймача [2].

Недоліком даного технічного рішення є те, що вимірювання температури сушильного циліндра можливе лише в одній точці сушильного циліндра на боковій стінці, що не дає змоги отримати дані про температуру по ширині стінки всього сушильного циліндра, яка контактує з паперовим полотном.

20 В основу корисної моделі поставлена задача удосконалення приладу для вимірювання температури сушильного циліндра, підвищення точності вимірювання температури стінки сушильного циліндра, отримання даних для керування процесом сушіння паперового полотна, а також спрощення системи передачі вимірюваної інформації.

25 Поставлена задача вирішується тим, що прилад для вимірювання температури стінки сушильного циліндра містить датчик температури, який вмонтовано в торцеву стінку сушильного циліндра, радіочастотний приймач сигналу, канал бездротової передачі інформації від датчика температури до радіочастотного приймача та операторську панель обробки інформації. Як датчик температури використовують пірометр, який розміщено під сушильним циліндром на опорі, яка рухається вздовж осі сушильного циліндра, а радіочастотний приймач інтегровано в операторську панель обробки інформації.

30 Суть корисної моделі пояснює креслення, де представлена схема приладу для вимірювання температури стінки сушильного циліндра, який містить: сушильний циліндр 1, що обертається навколо осі 2 у напрямку, зазначеному стрілкою 9; пірометр 3 встановлений на опорі 4, що рухається по направляючих рейках 5 у напрямку, вказаному стрілкою 7, канал 8 бездротового зв'язку між пірометром 3 та операторською панеллю 6 обробки інформації.

Прилад працює таким чином:

40 Сушильний циліндр 1 обертається навколо осі 2 у напрямку, зазначеному стрілкою 9. Під сушильним циліндром 1, на опорі 4, розташовано пірометр 3, який направлено на частину сушильного циліндра, що не контактує з паперовим полотном. Опора 4 постійно рухається по направляючих рейках 5 вздовж осі сушильного циліндра 1. Під час переміщення опори 4, пірометр 3 вимірює значення температури сушильного циліндра 1 по всій його ширині, що підвищує точність вимірювання температури стінки сушильного циліндра і дає змогу отримати дані про температуру по ширині стінки всього сушильного циліндра, яка контактує з паперовим полотном. Виміряне значення з пірометра 3, по каналу 8 бездротового зв'язку передається на операторську панель 6 обробки інформації. З отриманих даних будується температурне поле сушильного циліндра 1, що дає змогу керувати процесом сушіння паперового полотна.

50 Таким чином, прилад дозволяє отримати інформацію про температуру в кожній точці сушильного циліндра. Ці дані можуть бути використані для встановлення дефектів в роботі системи нагрівання сушильного циліндра (ділянка циліндра, де температура відрізняється від середньої), а також для керування процесом сушіння паперового полотна.

Джерела інформації:

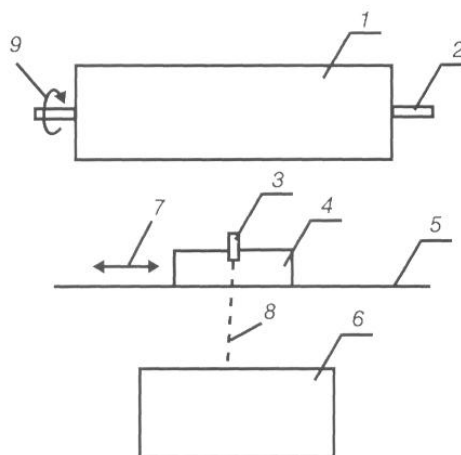
55 1. Авторське свідоцтво № 1004324/29-14 МПК8 D21F. "Приспособление к бумагоделательной машине для измерения температуры сушильных цилиндров", опубліковано 21.05.66.

2. Патент US6104987 МПК8 D21F 5/06. "System for monitoring dryer drum temperatures", опубліковано 14.04.99.

UA 107812 U

## ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 5 Прилад для вимірювання температури стінки сушильного циліндра, що містить датчик температури, який вмонтовано в торцеву стінку сушильного циліндра, радіочастотний приймач сигналу, канал бездротової передачі інформації від датчика температури до радіочастотного приймача та операторську панель обробки інформації, який **відрізняється** тим, що як датчик температури використовують пірометр, який розміщено під сушильним циліндром на опорі, яка рухається вздовж осі сушильного циліндра, а радіочастотний приймач інтегровано в операторську панель обробки інформації.



Комп'ютерна верстка Л. Бурлак

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

## ДОДАТОК В

## Акт впровадження



КИЇВСЬКИЙ  
КАРТОННО-ПАПЕРОВИЙ  
КОМБІНАТ



PULP MILL  
MILLING

ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат»  
08700 Україна, м. Обухів, Київська обл., вул. Київська 130  
тел. +38(04572) 76-300, 76-440  
Факс: +38(04572) 76-540  
Email: info@papier.kiev.ua  
www.papir.kiev.ua

Код ЄДРПОУ 05509659  
ІПН 055096510163

Вих. № 87-25/28005 від 28.11 2016р.

## АКТ

про практичне використання результатів дисертаційної роботи асистента  
Національного технічного університету України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського» Черьопкіна Євгенія Сергійовича

На ПрАТ "Київський картонно-паперовий комбінат" асистентом кафедри  
Автоматизації хімічних виробництв, Національного технічного університету  
України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Черьопкіним  
Євгенієм Сергійовичем передано технічні пропозиції, методики та рекомендації  
по створенню та налаштуванню системи керування сушильною частиною  
папероробної машини, а саме:

- результати дослідження та рекомендації щодо алгоритму розрахунку  
оптимального температурного графіка прогрівання паперового полотна;
- метод керування процесом прогрівання паперового полотна на основі  
рівня збурювальних впливів у системі;
- технічні пропозиції щодо структури системи оптимального керування  
процесом прогрівання паперового полотна.

Отримані матеріали використано для керування процесом сушіння  
паперового полотна на папероробній машині ПРМ-1,2.

Головний енергетик



Пуха А.І.

## ДОДАТОК Г

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Жученко А. І., Керування процесом прогрівання паперового полотна на основі методу динамічного програмування / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Технологический аудит и резервы производства. Vol 6, No 7(26) (2015) Scientific outcomes 2015. – С. 6 – 10 (*Індексується та реферується наукометричними базами Index Copernicus, Bielefeld Academic Search Engine, Directory of Research Journals Indexing, Open Academic Journals Index, PИИЦ, WorldCat*). Здобувачем створено структуру системи керування на основі блоку аналізу рівня збурювальних впливів у системі, розроблено метод керування нелінійними процесами з використання методу динамічного програмування;
2. Черёпкин Е. С. Постановка задачі оптимального управління процесом прогрева бумажного полотна в сушильній частині бумагоделательної машини. / Жученко А. І., Черёпкин Е. С. // Автоматизація промислових і бізнес процесів. – О.: 2015 – № 22. – С. 25 – 31 (*Індексується та реферується наукометричними базами EBSCO, Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського, Асоціації «УРАИ», Directory of Research Journal Indexing (DRJI), Open Academic Journal Indexing (OAJI), Directory of Open Access Journals (DOAJ), Index Copernicus International, PИИЦ, WorldCat* ). Здобувачем побудована, на основі експериментальних даних, функціональних залежностей між параметрами якості паперового полотна і керувальними впливами;
3. Черёпкин Е. С. Параметричний аналіз папероробної машини як об'єкта автоматичного керування. / Жученко А. І., Черёпкин Е. С. // Технологический аудит и резервы производства. – Х.: 2014. – С. 81 – 86 (*Індексується та реферується наукометричними базами Index Copernicus, Bielefeld Academic Search Engine, Directory of Research Journals Indexing, Open Academic Journals Index, PИИЦ, WorldCat*). Здобувачем проведено аналіз роботи відомих приладів для вимірювання температури паперового полотна у сушильній частині папероробної машини, пошук недоліків відомих засобів вимірювання, розробка приладу;

4. Жученко А. І. Реалізація алгоритму розрахунку прогрівання паперового полотна. / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – К.: НТУУ «КПІ». –2015. – №1 (13). – С. 88 – 91. *Здобувачем розроблено програмне рішення для реалізації алгоритму розрахунку оптимального температурного графіку прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини;*

5. Жученко А. И. / Расчёт прогрева бумажного полотна. / Жученко А. И., Черёпкин Е. С. //Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – К.: НТУУ «КПІ». – 2014. –№2 (13). – С. 104 –110. *Здобувачем розроблено алгоритм розрахунку оптимального температурного графіку прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини;*

6. Черёпкин Е. С. Математическая модель прогрева бумажного полотна в сушильной части бумагоделательной машины / Жученко А. И., Черёпкин Е. С. // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – К.: НТУУ «КПІ», 2014 1 (12). – С. 106 – 114. *Здобувачем розроблено систему рівнянь для розрахунку температури паперового полотна на виході з сушильних циліндрів та ділянок вільного руху;*

7. Патент України на корисну модель UA 107812 МПК (2016.01) D21F 5/00 G01K 13/00. Прилад для вимірювання температури стінки сушильного циліндра / А. І. Жученко, Є. С. Черьопкін. Опубл. 24.06.2016. – Бюл. № 12. – 3с *Здобувачем проведено аналіз роботи відомих приладів для вимірювання температури паперового полотна у сушильній частині папероробної машини, пошук недоліків відомих засобів вимірювання, розробка приладу ;*

8. Черьопкін Є. С. Параметричний аналіз сушильної частини папероробної машини як об'єкта автоматичного керування [текст] / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Тези доповідей XXI міжнародної конференції з

автоматичного управління «Автоматика 2014». К.: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 274 – 276(*очна участь*) *Здобувачем проведено аналіз літературних джерел за темою дисертації;*

9. Черёпкин Е. С. Постановка задачи для следящей системы регулирования процессом прогрева бумажного полотна [текст] / Жученко А. И., Черёпкин Е. С. // Матеріали XII Міжнародної конференції "Контроль і управління в складних системах" (КУСС-2014). 14 по 16 жовтня 2014 року у м. Вінниця. – С. 150(*заочна участь*) *Здобувачем сформована задача для оптимальної роботи системи керування;*

10. Черёпкин Е. С. Постановка задачи оптимального управления процессом прогрева бумажного полотна [текст] / Жученко А. И., Черёпкин Е. С. // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27 [текст]: сб. трудов XXVII Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т.5. Секция 3 / под общ. ред. А.А. Большакова. – Тамбов : Тамбовск. гос. техн. ун-т, 2014. – С. 84 – 85(*заочна участь*) *Здобувачем побудована, на основі експериментальних даних, функціональних залежностей між параметрами якості паперового полотна і керувальними впливами ;*

11. Черёпкин Е. С. Сушильная часть БДМ как объект автоматического управления [текст] / Жученко А. И., Черёпкин Е. С. // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами», 27 листопада 2014 р. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2014 р. С – 41 – 43(*заочна участь*) *Здобувачем проведено параметричний аналіз сушильної частини;*

12. Черёпкин Е. С. Обмеження на параметры качества при построении температурного графика прогрева паперового полотна [текст] / Жученко А. И., Черёпкин Е. С. // Тези доповідей науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» -2014; Київ, НТУУ «КПІ», 10 листопада 2014. – К: НТУУ «КПІ» 2014. – 85с(*очна участь*) *Здобувачем сформульовані обмеження на параметри якості;*

13. Черьопкін Є. С. Слідкувальна система керування процесом прогрівання паперового полотна [текст] / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Тези доповідей науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» -2014; Київ, НТУУ «КПІ», 10 листопада 2014. – К: НТУУ «КПІ» 2014. С – 96(очна участь) *Здобувачем розроблено структуру системи керування;*

14. Черьопкін Є. С. Селекторний блок керування за рівнем збурення у системі [текст] / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Техника и технология. Современные тенденции в науке и образовании/inzynieria i technologia. wspolczesne tendencje w nauce i edukacji Gdansk, 30.03.2016- 31.03.2016. С – 10 – 13(заочна участь) *Здобувачем розроблено алгоритм роботи селекторного блоку за рівнем збурення;*

15. Черьопкін Є. С. Адаптація параметрів ПІД-регулятора відповідно до зміни роботи системи [текст] / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології 2016. – Місце проведення – НТУУ "КПІ", Київ; Дата проведення: 21.04.2016. С – 62 – 63(очна участь) *Здобувачем розроблено алгоритм адаптації параметрів регулятора;*

16. Черьопкін Є. С. Керування процесом прогрівання паперового полотна при відсутності збурень [текст] / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами. – Місце проведення – НУХТ, Київ; Дата проведення: 25.11.2015. С – 41 – 43(заочна участь) *Здобувачем проведено експериментальні дослідження роботи системи керування;*

17. Черьопкін Є. С. Використання блока автоналаштування параметрів ПІД-регулятора в LabView [текст] / Жученко А. І., Черьопкін Є. С. // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (дев'ята науково-практична конференція студентів. – Дата проведення: 09.12.2015. С – 54 – 56(очна участь) *Здобувачем проведено дослідження роботи блоку автоналаштування параметрів регулятора.*