

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Черьопкін Євгеній Сергійович

УДК 681.51:676.2.026.5

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

05.13.07 – автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Жученко Анатолій Іванович, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
завідувач кафедри автоматизації хімічних виробництв.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України
Ладанюк Анатолій Петрович, Національний університет харчових технологій, завідувач кафедри автоматизації та інтелектуальних систем керування.

кандидат технічних наук, доцент
Решетюк Володимир Михайлович, Національний університет біоресурсів і природокористування України, доцент кафедри автоматики і робототехнічних систем ім. акад. І.І.Мартиненка

Захист відбудеться "11" жовтня 2017 р. о 14 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.04 при Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37, корп. 19, ауд. № 530

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « ____ » вересня 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент

Д.О. Ковалюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Папероробна машина(ПРМ) 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 тенденції 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., Бельского О. П., Лакомкіна В. Ю., Жучкова П.А., Буйлова Г.П., Анашкина А.С., Akesson J., Ekvall J., Bassily A. M., Radha R., Slätteke O.

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 задачі 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 ПРМ.

Методи дослідження. Для обґрунтування актуальності, мети і завдань дослідження було використано метод аналізу інформації щодо автоматичних систем керування технологічними процесами папероробної машини. Метод системного аналізу був застосований для формулювання мети дослідження, визначення основних задач, створення структури системи керування, вибору критерію оптимальності та пошуку оптимального варіанту структури системи керування. Методи математичного моделювання застосовувались для розробки математичної моделі процесу прогрівання паперового полотна. Під час перевірки статистичних гіпотез з метою оцінювання адекватності розробленої математичної моделі застосовано методи математичної статистики. Методи динамічного програмування використані при пошуку оптимального розв'язку задачі керування технологічним процесом прогрівання паперового полотна. З метою розробки структури та алгоритмів керування застосовані методи аналізу і синтезу систем автоматичного керування. Методи імітаційного моделювання використані при визначенні ефективності запропонованих систем, методик і алгоритмів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- 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 конфігурації обладнання та зміни виду продукції;
- вперше розроблено і досліджено селективну систему автоматичного керування процесом прогрівання паперового полотна на основі ПД-регуляторів із застосуванням методу динамічного програмування.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

- 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 масопереносу, 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 імені 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 [1] – створено структуру системи керування на основі блоку аналізу рівня збурювальних впливів у системі; у [2] – побудова на основі експериментальних даних функціональних залежностей між параметрами якості паперового полотна і керувальними впливами; у [3] – проведено аналіз роботи відомих приладів для вимірювання температури паперового полотна у сушильній частині папероробної машини, пошук недоліків відомих засобів вимірювання, розробка приладу; у [4] – розроблено програмне рішення для реалізації алгоритму розрахунку оптимального температурного графіку прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини; у [5] – розроблено алгоритм розрахунку оптимального температурного графіку прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини; у [6] – розроблено систему рівнянь для розрахунку температури паперового полотна на виході з сушильних циліндрів та ділянок вільного руху.

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** – патент на корисну модель; **10** – матеріалів доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 161 сторінок, у тому числі 7 таблиць, 47 ілюстрацій за текстом, 4 додатки на 18 сторінках, список використаних джерел з 84 найменувань на 7 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, показано її зв'язок з науковими планами і програмами, сформульовані мета, задачі, об'єкт та предмет дослідження, визначено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, наведено відомості про апробацію результатів дисертації, а також про публікації за темою дисертаційної роботи.

Перший розділ присвячено аналізу технологічних процесів виробництва паперового полотна як об'єктів автоматичного керування.

Папероробна машина є ключовим технологічним елементом процесу виробництва паперової продукції. Вона являє собою багатостадійний процес перетворення целюлозної або макулатурної маси у готові паперові вироби.

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 найбільш матеріально- та енергозатратною:

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

Перелічені 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, а в особливості розробки системи автоматичного керування процесом прогрівання полотна, що є визначальним, з точки зору параметрів якості, етапом сушіння.

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. Відсутні дані про вибір критерію якості керування процесом прогрівання паперового полотна, як окремого етапу процесу сушіння паперового полотна.

За результатами проведеного аналізу сформульовано завдання дослідження.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений розробленню математичної моделі процесу прогрівання паперового полотна в сушильній частині папероробної машини.

Оскільки будь-яка математична модель є відображенням лише частини властивостей об'єкту, що розглядається (основних елементів, які необхідні для розв'язання поставленої задачі) було сформульовано спрощуючі припущення.

Нестационарність тепломасообміну в процесі сушіння паперового полотна на багатоциліндрових установках, що обумовлена періодичністю контакту вологого матеріалу з нагрітими циліндрами і навколишнім повітрям, а також періодами сушіння вологих матеріалів робить доцільним проведення розрахунку кінетики тепломасообміну контактено-конвективних установок 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.1). Точка 1 є моментом контакту паперового полотна із сушильним циліндром; точка 2 – вихід паперового полотна із сушильного циліндру, 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.

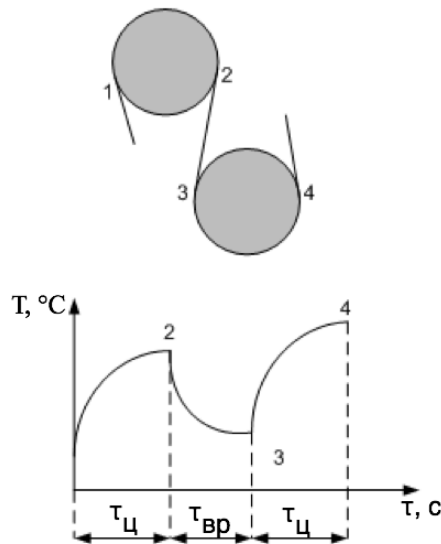


Рисунок 1 – Схема контрольних точок контакту паперового полотна із сушильним циліндром і ділянок вільного ходу

Взявши за основу рівняння тепло- та масопреносу та нестационарної теплопровідності:

$$\left\{ \begin{array}{l} dq_{\text{КТ}} = \alpha_{\text{КТ}}(t_{\text{ц}} - t_{\text{п}})d\tau = (c_{\text{СП}} + c_{\text{В}}u_0)P_{\text{СП}}dt_{\text{п}} \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon r}{(c_{\text{с}} + c_{\text{w}}u)} \frac{\partial u}{\partial \tau} \\ \beta_p(p_{\text{п}} - p_{\text{нс}})r d\tau = P_{\text{СП}}(c_{\text{СП}} + c_{\text{В}}u_0) dt_{\text{КШ}} \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} = b_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + b_m b_t \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \end{array} \right.$$

де де $t_{\text{ц}}$, $t_{\text{п}}$ – температура сушильного циліндра і паперового полотна, °С; $\alpha_{\text{КТ}}$ – коефіцієнт контактного теплообміну, Вт / (м²К); τ – тривалість контакту паперового полотна із сушильним циліндром, с; $P_{\text{СП}}$ – маса квадратного метра сухого полотна, г/м²; $c_{\text{СП}}$ – теплоємність сухого паперового полотна, кДж/(кгК); $c_{\text{В}}$ – теплоємність води, кДж/кгК; u_0 – початковий вміст вологи у паперовому полотні, кг/кг; t – температура, °С; τ – тривалість процесу, с; x – координата; a – температуропровідність матеріалу, м²/год; ε – коефіцієнт фазового перетворення; u – вміст вологи, кг/кг; $c_{\text{с}}$ – теплоємність сухого матеріалу, кДж/(кг°С); c_{w} – теплоємність води, кДж / (кг°С); $p_{\text{п}}$, $p_{\text{нс}}$ – парціальні тиски на поверхні матеріалу і в навколишньому середовищі, Па; B – коефіцієнт, що враховує особливості матеріалу, повітря і протікання процесу;

розроблено математичні моделі контактного та конвективного сушіння для етапу прогрівання паперового полотна у відповідності до механізму тепломасопереносу під час його перебування на сушильному циліндрі та ділянці вільного руху.

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 розрахункове значення критерію Стьюдента та Фішера для всіх точок масивів експериментальних температур та отриманих за математичною моделлю з табличним, можна зробити висновок, що немає підстав відхилити 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 із сушильного циліндру, в кінці ділянки вільного руху та розрахунок температури центрального шару паперового полотна.

У **третьому розділі** проведено вибір критерію якості керування процесом прогрівання паперового полотна. Оскільки його основним завданням є доведення температури паперового полотна до заданого значення за якого починається ефективне виділення вологи без погіршення показників якості готової продукції було

поставлено наступне наукове завдання: необхідно знайти такі керувальні дії (витрата пари в сушильні циліндри), які забезпечують дотримання температурного графіка прогрівання полотна з мінімальним відхиленням.

Для такої задачі критерій оптимального керування приймає наступний вигляд:

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

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).

За обмежень:

$$\begin{cases} |T_i^{real} - T_i^{zad}| \leq e \\ F_{min}^c \leq F_i^c \leq F_{max}^c \\ T_{min}^c \leq T_i^c \leq T_{max}^c \end{cases}$$

Обмеження на параметри якості

де e – допустиме температурне відхилення (залежить від типу паперу), °C; 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; T_{min}^c – мінімальне значення температури, при якому параметри якості паперу відповідають встановленим у стандарті значенням, °C; T_{max}^c – максимальне значення температури, при якому параметри якості паперу відповідають встановленим у стандарті значенням, °C. Обмеження на параметри якості залежать від виду паперу, що виробляється і формуються окремо.

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 загальний вигляд якого наведено на рисунку:

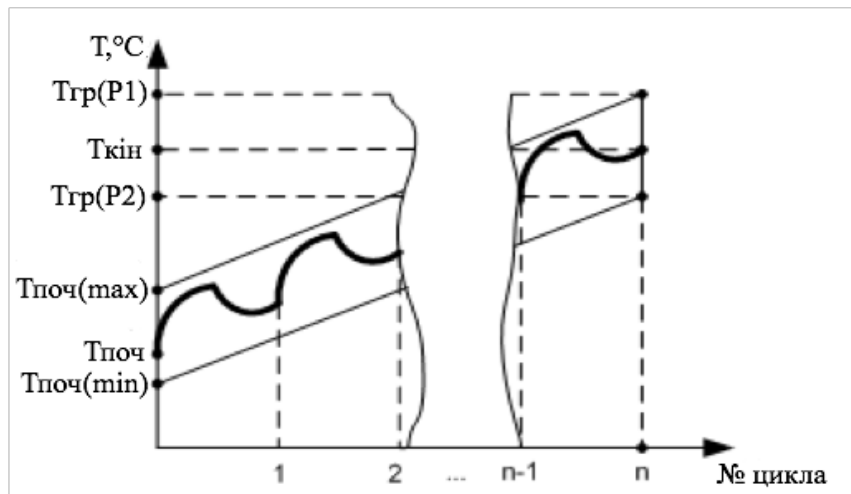


Рисунок 2 – Загальний оптимальний графік прогрівання паперового полотна. $T_{гр}(P1)$ – максимально допустиме значення температури паперового полотна в кінці етапу прогрівання, обмежене найбільш чутливим параметром якості, °C; $T_{гр}(P2)$ – мінімально допустиме значення температури паперового полотна в кінці етапу прогрівання, обмежене найбільш чутливим параметром якості, °C; $T_{кін}$ – температура паперу в кінці етапу прогрівання, °C; $T_{поч}$ – температура паперу на початку етапу прогрівання, °C; $T_{поч}(min)$ – мінімально можлива початкова температура паперу, °C; $T_{поч}(max)$ – максимально можлива початкова температура паперу, °C

Алгоритм, що розроблений для розрахунку оптимального температурного графіку прогрівання, складається з двох частин:

- 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 сушильного циліндру 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 частини (параметри сушильних циліндрів, ділянок вільного руху), дані про вид паперу, що виробляється, критичні значення його показників якості, що нормуються відповідним стандартом (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.

Створений алгоритм було покладено в основу прикладного програмного

забезпечення для коригування оптимального температурного графіка прогрівання у реальному часі. Ключовими модулями розробленого рішення є:

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.

Результатом роботи програмного забезпечення є оптимальний графік прогрівання паперового полотна в сушильній частині папероробної машини:

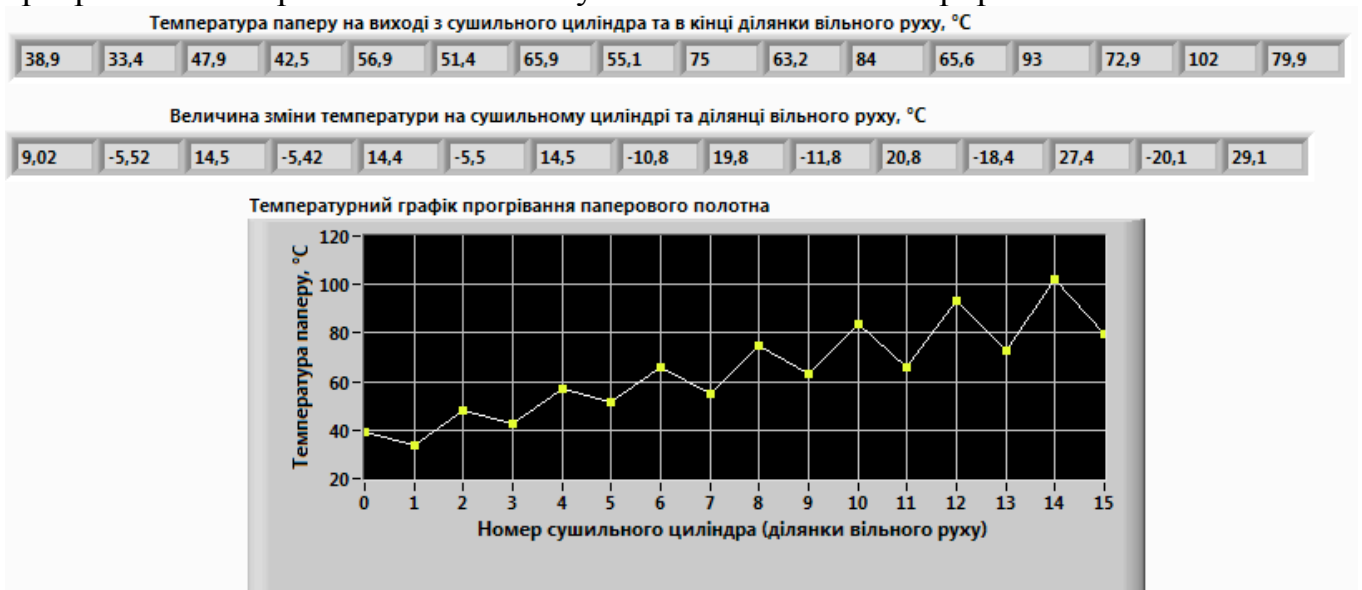


Рисунок 3 – Результати роботи програми

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.

Четвертий розділ присвячено розробці системи керування прогріванням паперового полотна. За основу розробленої системи керування взято класичну слідкувальну систему і доповнено додатковим зворотнім зв'язком:

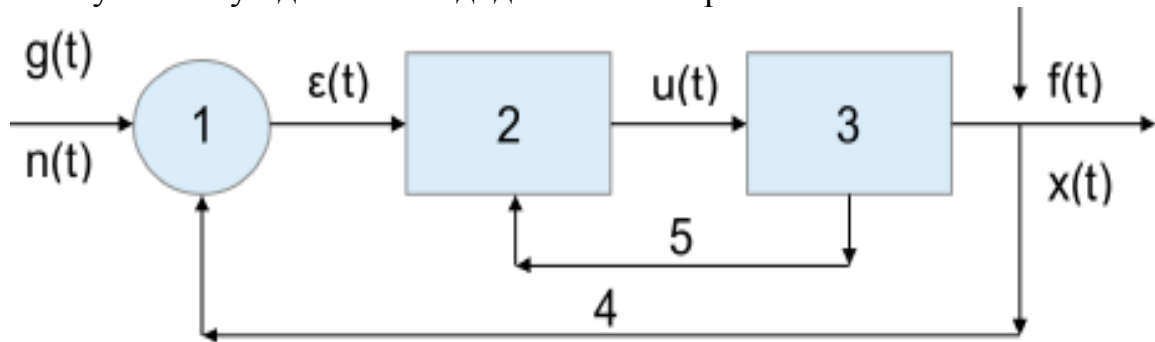


Рисунок 4 – Структурна схема розробленої слідкувальної системи $g(t)$ – задана вхідна величина; $n(t)$ – вхідні збурення; $\varepsilon(t)$ – сигнал розузгодження; $u(t)$ – сигнал керування; $f(t)$ – збурення в об'єкті керування; $x(t)$ – вихідна величина; 1 – пристрій порівняння; 2 – регулятор; 3 – об'єкт керування з виконавчим механізмом; 4 – головний зворотний зв'язок; 5 – допоміжний зворотний зв'язок

За результатами досліджень проведено вдосконалення даної системи з урахуванням особливостей протікання технологічного процесу, що розглядається та визначених задач для системи керування процесом прогрівання паперового полотна. Базова структурна схема системи селективного оптимального керування процесом прогрівання паперового полотна зображена на рис. 5:

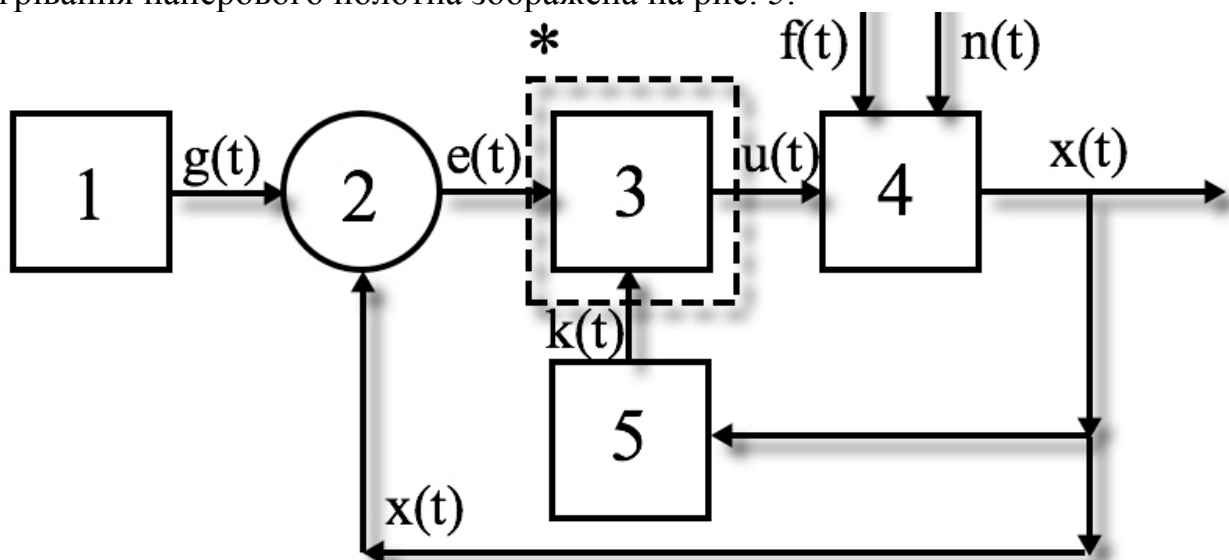


Рисунок 5 – Базова структурна схема системи адаптивного оптимального керування процесом прогрівання паперового полотна

В рамках дослідження проведено порівняльний аналіз внутрішньої структури блоку керування (блок 3 рис. 5) наступних конфігурацій:

- регулятор на основі методу динамічного програмування;
- один ПД-регулятор з алгоритмом автоналаштування параметрів;
- три ПД-регулятори зі змінними межами об'єкту керування з автоналаштуванням;
- комбінована структура: метод динамічного програмування + ПД-регулятори зі змінними межами об'єкту керування з автоналаштуванням;

Проаналізувавши отримані дані про роботу системи керування, можна зробити практичний висновок. З одного боку, використання конфігурації блоку регулювання у вигляді трьох ПІД-регуляторів зі змінною структурою об'єкту керування є найбільш ефективним для керування процесом з високим рівнем збурювальних впливів:

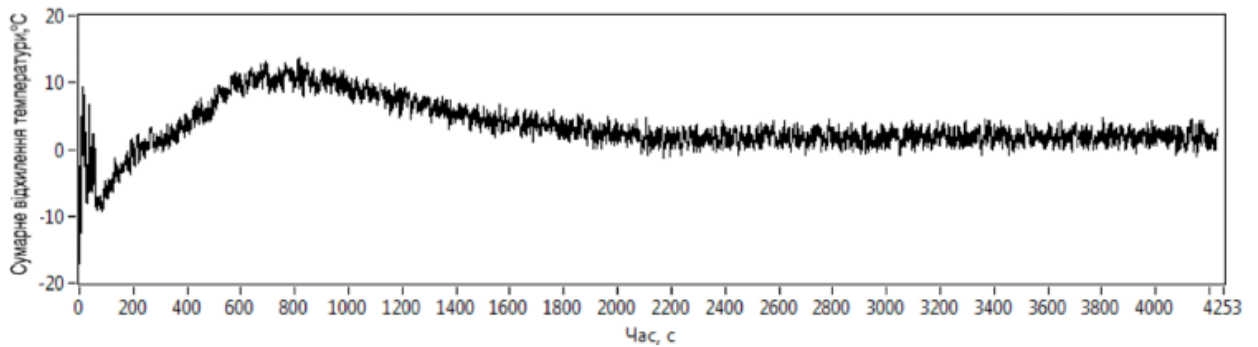


Рисунок 6 – Динаміка зміни сумарної похибки у часі в системі з трьома ПІД-регуляторами зі змінною структурою об'єкту керування та алгоритмом автоналаштуванням за рівня збурення 1%

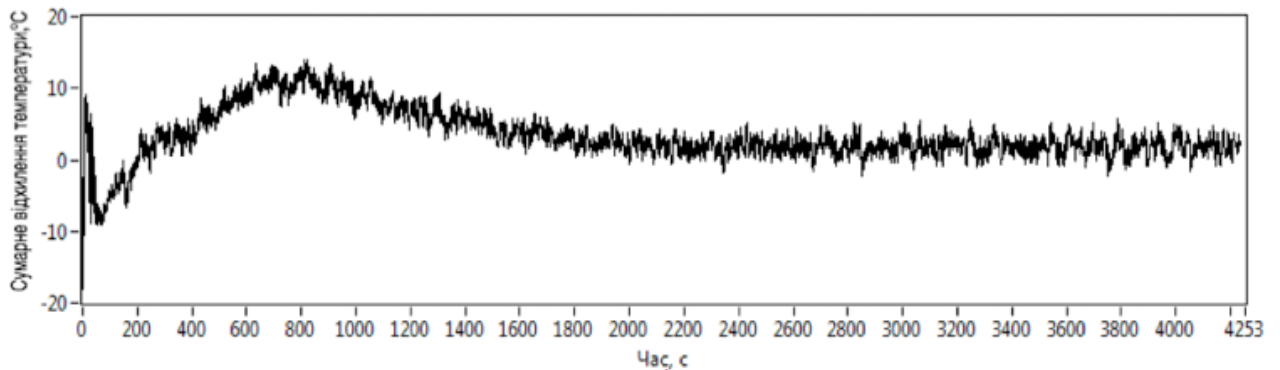


Рисунок 7 – Динаміка зміни сумарної похибки у часі в системі з трьома ПІД-регуляторами зі змінною структурою об'єкту керування та алгоритмом автоналаштуванням за рівня збурення 10%

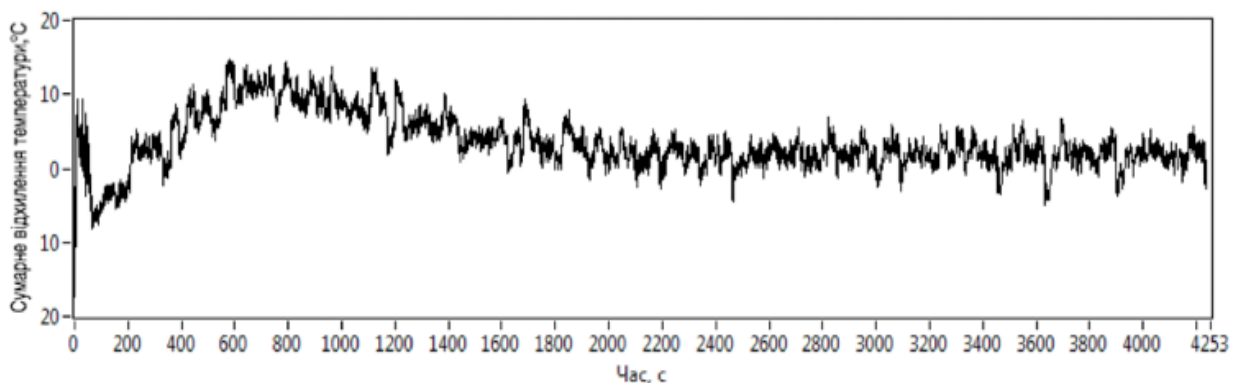


Рисунок 8 – Динаміка зміни сумарної похибки у часі в системі з трьома ПІД-регуляторами зі змінною структурою об'єкту керування та алгоритмом автоналаштуванням за рівня збурення 20%

З іншого боку, регулятор на основі методу динамічного програмування показав високу ефективність роботи за невеликих збурень та має більшу швидкодію у порівнянні з ПІД-регуляторами.

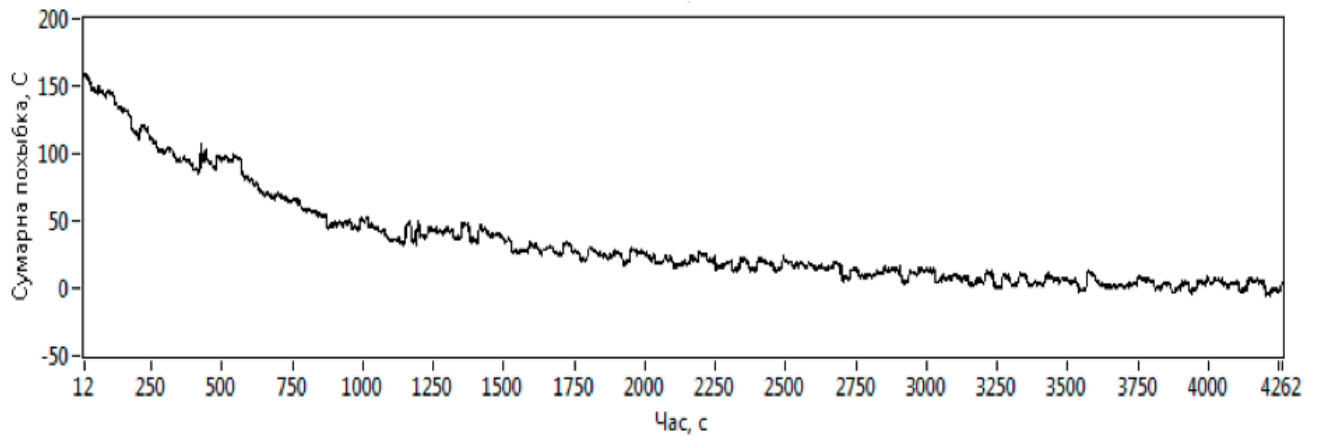


Рисунок 9 – Динаміка зміни сумарної похибки у часі в системі з використанням методу динамічного програмування за рівня збурення 1%

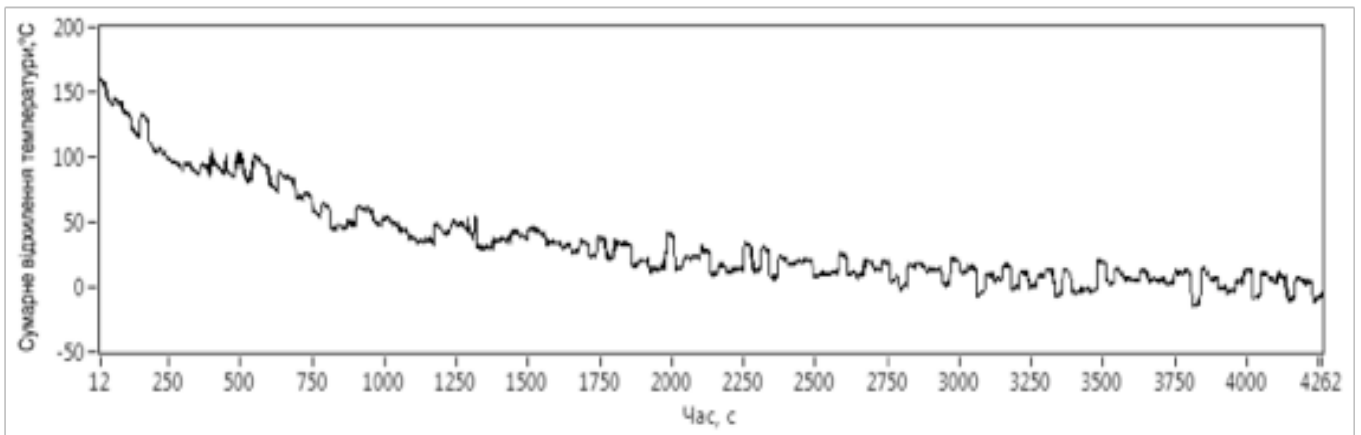


Рисунок 10 – Динаміка зміни сумарної похибки у часі в системі з використанням методу динамічного програмування за рівня збурення 10%

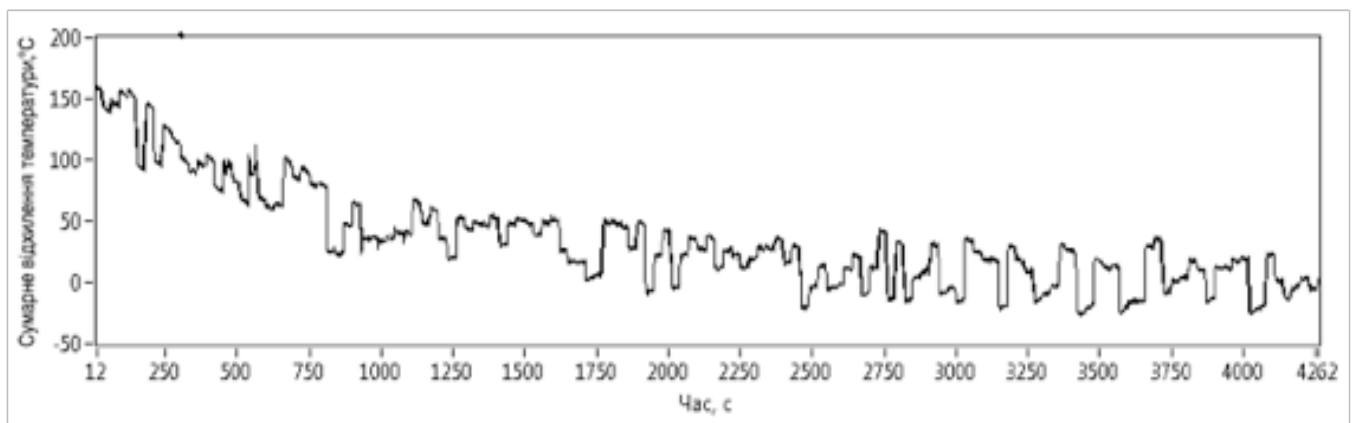


Рисунок 11 – Динаміка зміни сумарної похибки у часі в системі з використанням методу динамічного програмування за рівня збурення 20%

Тому, найбільш раціональним буде використання комбінованої структури блоку регулювання процесом прогрівання паперового полотна:

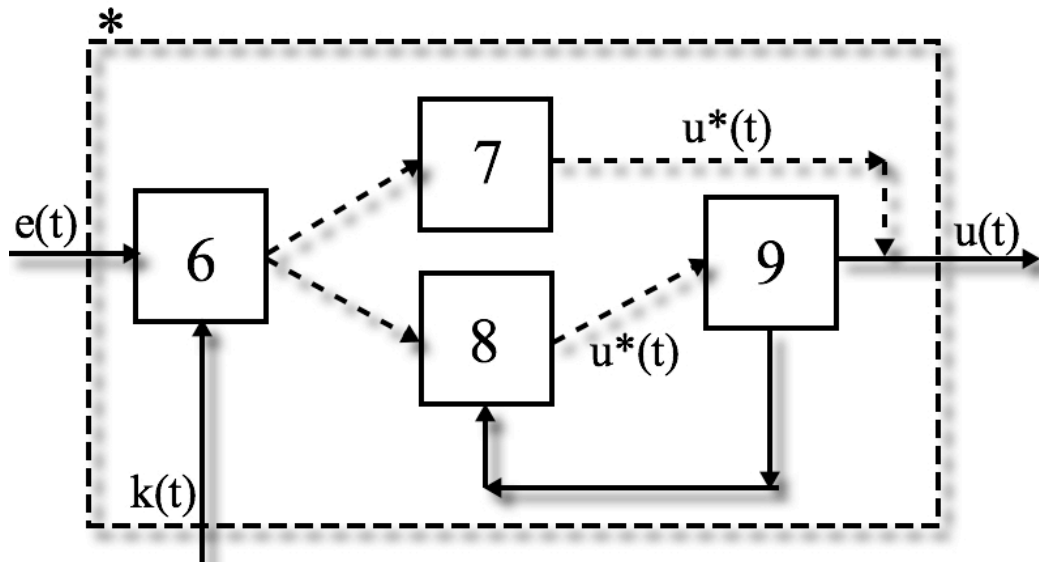


Рисунок 12 – Внутрішня структура блоку регулювання у системі оптимального керування процесом прогрівання паперового полотна

Робота такої системи відбувається наступним чином: сигнал похибки керування (різниця між поточним і оптимальним графіком температури паперового полотна) $e(t)$ та величина оцінки збурювального впливу $k(t)$ надходять до блоку селектора регулятора (блок 6 рис. 12). Його задачею є, на основі отриманої інформації, перемикання режимів роботи регулятора – на основі методу динамічного програмування (блок 7 рис. 12), або з використанням трьох ПД-регуляторів зі змінною структурою об'єкту керування з алгоритмом автоналаштування параметрів (блок 8 рис. 12). 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 їх 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. 12). 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.

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

Проведені експериментальні дослідження розробленої системи керування показали наступні результати:

1. За низьких рівнів 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 $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$).

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

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна науково-практична задача підвищення ефективності процесу прогрівання паперового полотна у сушильній частині папероробної машини шляхом створення оптимальної системи її керування, яка забезпечує функціонування ПРМ у режимі ресурсо- та енергозбереження за високої якості готової продукції.

Основні наукові висновки і практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведений аналіз літературних джерел довів можливість, використовуючи сучасні досягнення науки і техніки, удосконалення існуючих технічних рішень 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. Вдосконалено математичну модель тепло- та масопереносу для етапу прогрівання паперового полотна у відповідності до механізму тепломасопереносу та особливостей внутрішньої структури паперового полотна.

3. Проведене дослідження розробленої математичної моделі, з використанням статистичних критеріїв Стюдента та Фішера, підтвердило її адекватність реальному технологічному процесу прогрівання паперового полотна.

4. Запропоновано новий алгоритм розрахунку оптимального температурного графіку 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.

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

7. Розроблено 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 імені Ігоря Сікорського».

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, РІНЦ, 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 бумагоделательной машины. / Жученко А. И., Черёпкин Е. С. // Автоматизация промышленных і бизнес процесів. – О.: 2015 – № 22. – С. 25 – 31 (*Індексується та реферується наукометричними базами EBSCO, Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського, Асоціації «УРАН», Directory of Research Journal Indexing (DRJI), Open Academic Journal Indexing (OAJI), Directory of Open Access Journals (DOAJ), Index Copernicus International, РІНЦ, 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, 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;

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;

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;

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;

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;

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;

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;

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;

15. Черьопкін Є. С. Адаптація параметрів ПД-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;

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;

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.

АНОТАЦІЯ

Черьопкін Є. С. Автоматизація процесів керування прогріванням паперового полотна в сушильній частині папероробної машини. – Рукопис.

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 з точки зору якості готової продукції, ресурсо- та енергозбереження.

Розглянуто особливості процесу сушіння, проведено його параметричний аналіз як об'єкта автоматичного керування та проаналізовано сучасний стан математичного моделювання та керування його етапами.

Запропоновано математичну модель процесу прогрівання паперового полотна на основі рівнянь тепло- та масопереносу і нестационарної теплопровідності з урахуванням геометричних особливостей сушильної частини і властивостей паперового полотна. Виконана перевірка розробленої моделі на адекватність.

Вибрано критерій якості оптимального керування та сформовані обмеження на параметри якості готової продукції.

Розроблено прикладне програмне рішення для розрахунку оптимального температурного графіку прогрівання паперового полотна у реальному часі.

Розроблено адаптивну оптимальну систему керування процесом прогрівання паперового полотна у відповідності до рівня збурювальних впливів у системи із застосуванням методу динамічного програмування та ПД-регуляторів зі змінними межами об'єкту керування. Проведено дослідження, яке підтвердило ефективність запропонованої системи керування в умовах дії збурень різної величини.

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

АННОТАЦІЯ

Черёпкин Е. С. Автоматизация процессов управления прогревом бумажного полотна в сушильной части бумагоделательной машины. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 - автоматизация процессов управления. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2017.

Диссертация посвящена вопросам повышения эффективности процесса сушки бумажного полотна на бумагоделательной машине путем создания системы автоматизации процессов управления его прогрева как определяющего этапа сушки с точки зрения качества готовой продукции, ресурсо- и энергосбережения.

Проведен параметрический анализ технологических процессов, которые протекают на бумагоделательной машине как объектов автоматического управления. Выделены основные входные и выходные параметры, возмущающие и управляющие воздействия.

Установлено ключевую роль процесса сушки как основоопределяющей стадии с точки зрения параметров качества готовой продукции и эффективности ресурсо- и энергосбережения. Исследованы существующие решения в области математического моделирования и систем управления сушильной частью и выделены их недостатки.

Определено недостаточное рассмотрение вопроса управления прогреванием бумажного полотна, как первого и во многом определяющего этапа процесса сушки. Проанализированы основные его особенности и задачи.

Проведен анализ физико-химических процессов, которые протекают во время прохождения бумажного полотна по сушильным цилиндрам и участкам свободного хода.

Предложена математическая модель процесса прогрева бумажного полотна на основе уравнений тепло- и массопереноса и нестационарной теплопроводности с учетом геометрических особенностей сушильной части, и свойств бумажного полотна. Выделены две математические модели для контактной и конвективной сушки. Выполнена проверка разработанной модели на адекватность с использованием статистических критериев Стьюдента и Фишера. Результаты исследования позволяют считать разработанную математическую модель адекватной реальному процессу прогрева бумажного полотна.

Выбран критерий качества оптимального управления который заключается в подборе таких управляющих воздействий (расход пара в сушильные цилиндры), при которых будет происходить минимизация отклонения реальной температуры бумажного полотна на выходе с каждого сушильного цилиндра от заданного значения.

Проведено исследование взаимосвязи между управляющими воздействиями и параметрами качества продукции. Сформулированы ограничения на параметры качества готовой продукции и управляющие воздействия.

На основе анализа литературных данных и экспериментальных исследований разработано алгоритм расчета оптимального температурного графика прогрева бумажного полотна, что является заданием по температуре для критерия качества управления. Полученный алгоритм положен в основу разработанного специального прикладного программного обеспечения для корректировки задания управления в режиме реального времени в соответствии и полученными показаниями датчиков на объекте управления.

На основе классической следящей системы автоматического управления разработано систему управления процессом прогрева бумажного полотна в сушильной части бумагоделательной машины. Проведено исследование различных конфигураций блока управления на основе регулятора с применением метода динамического программирования, ПИД-регулятора с алгоритмом автонастройки, ПИД-регуляторов со сменными границами объекта управления и их возможные комбинации.

Эффективность разработанных решений проверялась на объекте управления при внедрении в него генератора возмущающих воздействий. С целью реализации селективной системы управления по величине возмущающего воздействия в системе был настроен блок определения оценки возмущающего воздействия и проведено исследование качества его работы.

Проведенные исследования показали, что наибольшую эффективность достигла комбинированная конфигурация блока управления с селективным управлением. В зависимости от уровня возмущающих воздействий в системе управление будет переходить на блок регулятора с использованием метода динамического программирования или на блок с тремя ПИД-регуляторами со сменными границами объекта управления.

Для повышения точности управления в систему интегрирован блок проверки результатов работы блока регулирования, которые на основе результатов имитационного моделирования, при необходимости, запускает механизм автоматической перенастройки параметров регулятора.

Ключевые слова: бумагоделательная машина, сушильная часть, математическое моделирование, прогревание бумажного полотна, критерий качества управления, система управления.

ABSTRACT

Cheropkin E. S. Automation processes control of the paper web heating in the dryer section of the paper machine.

The thesis for obtaining a scientific degree of PhD in Engineering at speciality of 05.13.07 - Automation of process control. - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute " Ministry of Education of Ukraine, Kyiv, 2017.

PhD Thesis is devoted to the problem of increasing the efficiency of paper web drying section in the paper machine by creating automation control system for heating paper web as a major step in terms of product quality, resource and energy effectiveness.

First chapter describes drying process as an object of automation control, held its parametric analysis. Conclusion about current state of mathematical modeling and control of drying section.

Second chapter contains results of mathematical modeling of heating the paper web process based on the equations of heat and mass transfer, unsteady heat conduction including parameters that based on geometric features of drying section and properties of the paper web. Performed results of the adequacy of the developed model check.

In the third chapter was selected criteria optimal control quality and generated restrictions on product quality parameters. Developed the application software solution for calculating the optimal temperature schedule of heating the paper web in real time mode.

Fourth part includes developed adaptive control system for optimal of heating paper web process according to the level of perturbation effects in control object using dynamic programming method and PID-controllers with removable off-site control. Presents results of study, which confirmed the effectiveness of the proposed control system in terms of the perturbation of different amount.

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