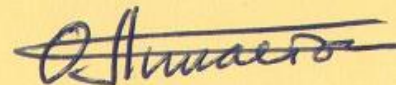


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Пігнастий Олег Михайлович



УДК 658.51.012

**СТАТИСТИЧНА ТЕОРІЯ
СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЧИМИ ПОТОЧНИМИ ЛІНІЯМИ**

Спеціальність 05.13.03 – системи і процеси керування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків 2014

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі комп'ютерного моніторингу і логістики
Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"
Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант:

доктор економічних наук, професор
Заруба Віктор Якович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
декан факультету економічної інформатики та менеджменту,
завідувач кафедри економічної кібернетики та маркетингового
менеджменту

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Бідюк Петро Іванович,
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут"
професор кафедри математичних методів системного аналізу

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Зелік Ярема Ігорович,
Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України,
провідний науковий співробітник

доктор технічних наук, професор
Удовенко Сергій Григорович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
професор кафедри електронних обчислювальних машин

Захист відбудеться „3” лютого 2015 р. о 14-30 годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 64.050.14 в Національному технічному університеті
"Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного
університету "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, Харків,
вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий „30” грудня 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ліберг І.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Конкурентоспроможність промислових підприємств з потоковим типом організації виробництва визначається ступенем ефективності систем управління поточними лініями. Характерною тенденцією розвитку сучасного промислового виробництва є постійне скорочення тривалості життєвого циклу продукції. У зв'язку з цим системи управління поточними лініями змушені значну частину життєвого циклу виробів функціонувати в перехідному несталому режимі. Проектування систем управління додатково ускладнено тим фактом, що високопродуктивний процес обробки виробів на кожній технологічній операції є стохастичним, а самі поточні лінії підприємств є багатомоделюваними, з технологічними маршрутами, що складаються з великої кількості операцій, в міжопераційних заділах яких знаходиться величезна кількість предметів праці. Традиційне застосування квазістатичних моделей для опису керованого виробничого процесу в таких умовах стає неприпустимим. У зв'язку з цим в останнє десятиліття особливу увагу приділяють розробці абсолютно нових типів моделей керованих виробничих процесів і систем оптимального управління такими процесами. Провідні світові компанії (Intel Corporation, Volkswagen AG, Royal Philips) поряд з фінансуванням численних наукових грантів створили експериментальні лабораторії з дослідження перехідних неусталених режимів функціонування поточних ліній.

Гостра необхідність вирішення зазначених проблем призвела до появи в останнє десятиліття значної кількості робіт, присвячених побудові математичних моделей керованих виробничих процесів з використанням рівнянь в частинних похідних (PDE-моделей). Великий практичний інтерес до цих моделей провідних світових корпорацій пояснюється перспективою їх використання у побудові високоефективних систем управління поточними лініями для перехідних режимів функціонування з урахуванням внутрішньої структури технологічного процесу.

Однак застосування математичних PDE-моделей виробничих процесів і побудова на їх основі систем оптимального управління зіткнулися з необхідністю вирішення ряду проблем, пов'язаних з виведенням нестационарних рівнянь стану керованого виробничого процесу, що є фундаментом моделі, і побудовою на їх основі багатомоментних нестационарних балансових рівнянь. Актуальність вирішення зазначених проблем визначила напрямок досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі комп'ютерного моніторингу і логістики Національного технічного університету «ХПІ» за планами науково-дослідних робіт відповідно до завдань держбюджетних тем МОН України: «Розробка теорії та методів синтезу систем управління квазістатичними технологічними процесами» (ДР №0108U001452), «Оперативне управління виробничо-фінансовою діяльністю підприємства» (ДР №0110U008127), «Застосування еволюційного підходу в моделюванні інформаційної економіки» (ДР №0110U000590), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка концептуальних положень і теоретичних основ статистичної теорії систем управління параметрами

виробничих ліній підприємств з поточним типом організації виробництва, що функціонують у перехідних неусталених режимах.

Для досягнення мети в дисертації поставлено наступні завдання:

- ✓ розробити концептуальні положення статистичної теорії систем управління виробничими поточними лініями і обґрунтувати необхідність застосування статистичного підходу для побудови моделей керованих виробничих процесів і методів оптимального управління цими процесами;
- ✓ запропонувати предметно-технологічний спосіб опису стохастичного процесу перенесення технологічних ресурсів на предмет праці в результаті впливу устаткування, що враховує структуру технологічних ресурсів і структуру ефективного часу обробки; розробити на його основі аналітичні методи проектування технологічних траєкторій предмета праці в просторі станів для побудови нестационарних рівнянь стану параметрів поточної лінії;
- ✓ запропонувати потоковий спосіб опису керованого виробничого процесу для перехідних неусталених режимів, що визначає динаміку зміни стану параметрів поточної лінії з урахуванням використовуваної технології виробництва та особливостей взаємодії предметів праці з обладнанням і між собою для проектування систем оптимального управління поточним виробництвом;
- ✓ визначити умови стійкості процесу управління поточним виробництвом для перехідних режимів;
- ✓ розробити метод побудови системи оптимального програмного керування станом міжопераційних заділів і інтенсивністю обробки предметів праці для перехідних режимів функціонування поточних ліній;
- ✓ розробити метод проектування системи оптимальної стабілізації стану міжопераційних заділів і інтенсивності обробки предметів праці для перехідних режимів функціонування поточних ліній;
- ✓ виконати експериментально-промислові дослідження розроблених методів оптимального управління параметрами поточної лінії і їх стабілізації в умовах реального серійного виробництва.

Об'єкт дослідження: керований виробничий процес.

Предметом дослідження є методи аналізу і синтезу статистичної теорії систем управління виробничими процесами, а також методи моделювання та оптимізації керованих процесів функціонування виробничих поточних ліній.

Методи дослідження: Теорія випадкових процесів для побудови моделі переносу технологічних ресурсів на предмет праці в результаті впливу технологічного обладнання; варіаційне числення для отримання рівнянь, що описують поведінку параметрів предметів праці в фазовому просторі станів; статистична теорія динамічних систем для побудови стохастичних самоузгоджених дворівневих нестационарних моделей виробничої поточної лінії; кінетична теорія для побудови рівняння, що описує еволюцію функції розподілу предметів праці по за станами у фазовому технологічному просторі станів; теорія функцій комплексного змінного і операційне числення для визначення частот коливань збурень поточних параметрів; теорія збурень для виведення замкнутих балансових рівнянь; теорія стійкості руху для визначення умов стійкості поточних параметрів виробничої лінії; теорія оптимального управління для розрахунку програм

управління поточними параметрами виробничої лінії; теорія стабілізації програмного руху для визначення оптимальних керуючих впливів, що забезпечують асимптотичну стійкість поточних параметрів виробничої лінії; теорія системної динаміки для обґрунтування статистичного підходу до побудови рівнянь рівнів і темпів виробничої поточної лінії.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у побудові та розвитку статистичної теорії систем управління виробничими поточними лініями. Виконані дослідження дозволили отримати результати, що мають наукову новизну.

Вперше:

1. Розроблено концептуальні положення статистичної теорії систем управління поточними лініями, в якій у порівнянні з традиційними підходами, що використовують для опису керованого виробничого процесу дискретно-подієві моделі, моделі теорії масового обслуговування і рідини, параметри стану потокової лінії визначено через модельні уявлення про стохастичний механізм впливу обладнання на предмет праці та взаємодії предметів праці між собою. Це дало можливість обґрунтувати існуючі та побудувати нові моделі керованих виробничих процесів і методи управління ними, а також визначити точність опису та межі застосовності.

2. Запропоновано предметно-технологічну стохастичну модель переносу технологічних ресурсів на предмет праці, засновану не на традиційному феноменологічному описі сталих виробничих явищ, а на законах збереження, що характеризують процес перенесення технологічних ресурсів на предмет праці, і просторово-часовій структурі технологічного процесу. Це дозволило отримати рівняння руху предметів праці за технологічним маршрутом і побудувати на їх основі нестационарні рівняння стану для параметрів поточної лінії.

3. Розроблено у дворівневому представленні керованого виробничого процесу метод побудови багатомоментних замкнутих балансових рівнянь у частинних похідних для параметрів поточної лінії, заснований на кінетичному описі виробничого процесу, що дозволило побудувати системи оптимального управління потоковим виробництвом для перехідних режимів з урахуванням використаної технології виробництва і стохастичного характеру взаємодії предметів праці з обладнанням і між собою на кожній операції технологічного маршруту. Отримано кінетичне інтегро-диференціальне рівняння виробничого процесу, розроблено методи його розв'язання і визначено критерії подібності для керованих виробничих процесів.

4. Визначено в двоментному наближенні умови стійкості процесу управління потоковим виробництвом для перехідних режимів функціонування, засновані на використанні першого методу Ляпунова, що дало можливість застосовувати алгоритми оптимальної стабілізації параметрів несинхронізованої поточної лінії для ліквідації виниклих збурень стану міжопераційних заділів й інтенсивності обробки предметів праці вибірково для окремих технологічних операцій, визначених критеріями стійкості. З використанням кінетичного наближення отримано дисперсійне рівняння та показано, що розроблена система управління синхронізованим потоковим виробництвом для перехідних режимів функціонування є асимптотично стійкою по входу.

5. Отримано оптимальне програмне керування міжопераційними заділами і інтенсивністю обробки предметів праці, засноване на розробленій багатомоментній дворівневій PDE-моделі опису керованого виробничого процесу. Це дало можливість для поточної лінії, функціонуючої в перехідних несталих режимах, побудувати систему управління її параметрами для кожної технологічної позиції з урахуванням технології виробництва і законів збереження, що характеризують процес перенесення технологічних ресурсів на предмет праці, значно скоротивши при цьому витрати обчислювальних ресурсів, необхідних для реалізації системи управління параметрами потокового виробництва.

6. Розроблено метод побудови системи оптимальної стабілізації стану міжопераційних заділів і продуктивності обробки предметів праці для перехідних режимів функціонування поточних ліній, який поряд з вимогою асимптотичної стійкості незбуреного стану параметрів, визначених програмою управління, враховує вимоги стосовно найкращої якості переходу до незбуреного стану. Таким чином значно скорочуються витрати технологічних ресурсів, що витрачаються на формування керуючих впливів для ліквідації виниклих збурень.

Удосконалено:

метод побудови рівнянь системної динаміки для мережі матеріальних потоків, який дозволяє обґрунтувати вибір виду рівнянь через модельні уявлення про властивості виробу і механізми впливу обладнання на нього, що підвищило точність опису та визначило межі застосовності рівнянь.

Отримали подальший розвиток:

ентропійна модель управління параметрами технологічного процесу, в якій функцію розподілу предметів праці за станами замість раніше вживаної феноменологічно визначено з кінетичної моделі, що дозволило аналітично обґрунтувати закон зростання ентропії і показати механізм незворотності технологічних явищ, що відбуваються.

Практичне значення отриманих результатів для напівпровідникової та автомобільної промисловості полягає в розробці систем управління параметрами виробничих ліній, які забезпечують можливість керування поточним виробництвом в перехідних режимах, скорочують рівень незавершеного виробництва і тривалість виробничого циклу виготовлення виробів, що призводить до значного підвищення ефективності використання технологічних ресурсів підприємств. Запропоновано методи побудови вискоєфективних систем управління, що забезпечують асимптотичну стійкість незбуреного стану параметрів поточної лінії для перехідних режимів. Теоретичні основи дисертаційної роботи доведені до рівня конкретних методик і рекомендацій з оптимального планування та управління виробничими процесами підприємства з поточним способом організації виробництва. Методологічні положення та практичні розробки дисертації впроваджено в систему управління виробничими процесами підприємств НВФ «Технологія» (м.Харків), АТ «Новий Стиль» (м.Харків), ТОВ «Харківський завод профілегибочного обладнання» (м.Харків), ТОВ «Імперія металів.»(м.Харків), що підтверджується відповідними актами та довідками. Запропоновані методи і моделі, а також програми, розроблені для їх реалізації, використовуються в навчальному процесі Національного

технічного університету «ХПІ» в дисциплінах, заснованих на вивченні методів організації, планування і управління виробництвом.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації, що виносяться на захист, отримано здобувачем особисто. Серед них: предметно-технологічна стохастична модель переносу технологічних ресурсів на предмет праці; метод побудови багатомоментних замкнених балансових рівнянь для параметрів поточної лінії, заснований на кінетичному описі керованого виробничого процесу; умови стійкості для керованого виробничого процесу; метод проектування систем оптимального програмного керування міжопераційними заділами й інтенсивністю обробки предметів праці для перехідних режимів функціонування поточної лінії; метод побудови системи оптимальної стабілізації стану міжопераційних заділів і продуктивності обробки предметів праці, що забезпечує асимптотичну стійкість незбуреного стану параметрів поточної лінії при заданій якості переходу до незбуреного стану.

Апробація результатів дослідження. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на: Міжнародній науково-технічній конференції «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2004», (Алушта, 2004); 1-й, 2-й та 3-й Міжнародних конференціях НАНУ «Статистична фізика: Загальні проблеми і нові застосування» (Львів, 2005; Харків, 2006; Львів, 2009); XII-й, XIV-й Всеукраїнських конференціях «Проблеми економічної кібернетики» (Львів, 2007; Харків, 2009); VI-International conference «Applications of physics in financial analysis, APFA6» (Lisbon, Portugal, 2007); XXIII International conference of statistical physics «Statphys-23», (Genova, Italia, 2007); VII-International conference «New approaches to the analysis of large-scale business and economic data. Applications of physics in financial analysis», (Tokyo, Japan, 2009); Міжнародній науково-практичній конференції ІПУ РАН «Управління великими системами» (Москва, 2009, 2011); Міжнародних науково-технічних конференціях «Комп'ютерне моделювання в наукомістких технологіях» (Харків, 2010, Харків, 2014); Міжнародній науково-технічній конференції «Моніторинг, моделювання та менеджмент емерджентної економіки» (Одеса, 2010), 2-й Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми розвитку економічної кібернетики» (Київ, 2010); Міжнародній конференції «Сучасні проблеми математики та її застосування у природничих науках і інформаційних технологіях» (Харків, 2011), XIX-XXII-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, освіта, здоров'я» (Харків, 2011-2014), 6-й, 7-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Математичне та імітаційне моделювання систем» МОДС 2011, МОДС 2012 (Чернігів, 2011, 2012), XV-й Міжнародній конференції «Моделювання та дослідження стійкості динамічних систем» DSMSI 2011 (Київ, 2011), 12-й, 15-й Міжнародних конференціях по математичному моделюванню (Херсон, 2011, 2014), IV-й Міжнародній конференції «Обчислювальна та прикладна математика» ОРМ2011 (Київ, 2011), 14-16-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Системний аналіз і інформаційні технології» (Київ, 2012-2014), 14-й Міжнародній конференції ім.М.Кравчука: «Теорія ймовірностей і математична статистика», (Київ, 2012); Международной научно-практической конференции «Информационные технологии в управлении» ИТУ-2012, (Санкт-Петербург, 2012);

Международной научно-практической конференции “Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах” УТЭОСС-2012, (Санкт-Петербург, 2012); 6 - й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2013 (Дивноморье, 2013г.)

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано у 79 наукових публікаціях, з них: 2 монографії (1- успівавторстві), 24 статті в наукових фахових виданнях України, 4 – у наукометрических базах даних, 1 – в іноземних періодичних фахових виданнях, 33- у матеріалах конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, шести розділів, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації - 295 сторінок, з них 69 рисунків по тексту, 11 таблиць по тексту, додатки на 4 сторінках, список використаних джерел з 274 найменувань на 23 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, що підкреслює її актуальність, наукову новизну і практичне значення; визначено об'єкт і предмет дослідження, сформульовано мету і завдання роботи.

У **першому розділі** здійснено аналіз досліджень, виконаних вченими та фахівцями в галузі побудови систем управління виробничими поточними лініями. Проаналізовано основні типи моделей керованих виробничих процесів, використовуваних при побудові систем управління поточними лініями. Серед них заслуговують увагу дискретно-подієві моделі керованого об'єкта (Ankenman В.Е., Bekki J.M., Fowler J., Бусленко Н. П., Шкурба В.В.), засновані на детальній імітації процесу перенесення технологічних ресурсів на предмет праці для кожної одиниці обладнання поточної лінії. Uzsoy R., Kasar N. використовували дискретно-подієві моделі для опису поточної лінії при уточненні інформації про стан предметів праці уздовж технологічного маршруту.

Питанням використання моделей теорії масового обслуговування для опису керованого виробничого процесу і побудові на їх основі методів управління параметрами поточних ліній присвячено роботи Buzacott J. A., Shanthikumar J. G., Chao X., Норр W. J., Lefeber E., Первозванского А. А., Лысенко Ю. Г., Коробецкого Ю. П., які зосередили свою увагу на взаємному зв'язку між тривалістю виробничого циклу виготовлення партії деталей і кількістю предметів праці у міжопераційних накопичувачах. Kefeli A, Fathi Y, Kay M., Forrester J. застосували поширений підхід до проектування систем управління виробничими поточними лініями з використанням для опису об'єктів управління моделей рідини, що містять рівняння переносу. Даний клас використовується для опису перехідних нестационарних, в основному детермінованих виробничих процесів

Подальше комбінування і вдосконалення моделей керованих виробничих процесів, а також наявність одноманітних завдань планування та управління привело до створення єдиної теорії виробничих систем з потоковим способом організації виробництва (Graves S. C., Karmarkar U. S), в якій використано єдині параметри, що визначають стан виробничої системи: пропускну здатність $[\chi]$, обсяг незавершеного виробництва W , тривалість виробничого циклу T_d , і введено рівняння, що визначають зв'язок між цими параметрами. Це дозволило впорядкувати опис поточних ліній, але не усунуло основні недоліки, адже для

побудови рівняння стану було використано існуючі дискретно-подієві моделі, моделі масового обслуговування та рідини.

В останнє десятиліття для проектування систем управління потоковим виробництвом розроблено моделі, що містять рівняння у частинних похідних (PDE-моделі), які дозволяють врахувати вплив внутрішніх факторів виробництва і наявні технологічні обмеження, описати рух предметів праці від операції до операції, допускають розв'язання в аналітичному вигляді і не потребують значних обчислювальних ресурсів. Опубліковані дані експериментальних досліджень компанії Інтел показали, що запропоновані PDE-моделі задовільно описують керований виробничий процес для ustalених режимів, і незадовільно для перехідних. У зв'язку з цим подальше використання PDE-моделей в системах управління поточним виробництвом зіткнулося з необхідністю вирішення наступних проблем: а) виведення нестационарних рівнянь стану, заснованих на детальній технології обробки предмета праці; б) побудова для сталих і перехідних режимів багатомоментних замкнутих балансових моделей керованих виробничих процесів; в) побудова систем програмного оптимального управління параметрами виробничого процесу і систем стабілізації його параметрів для сталих і перехідних режимів функціонування поточних ліній.

Виконаний аналіз сучасних досягнень і невирішених завдань в області моделювання поточного виробництва дав можливість сформулювати основні напрями дослідження дисертаційної роботи, які представлені структурою дослідження (рис.1).

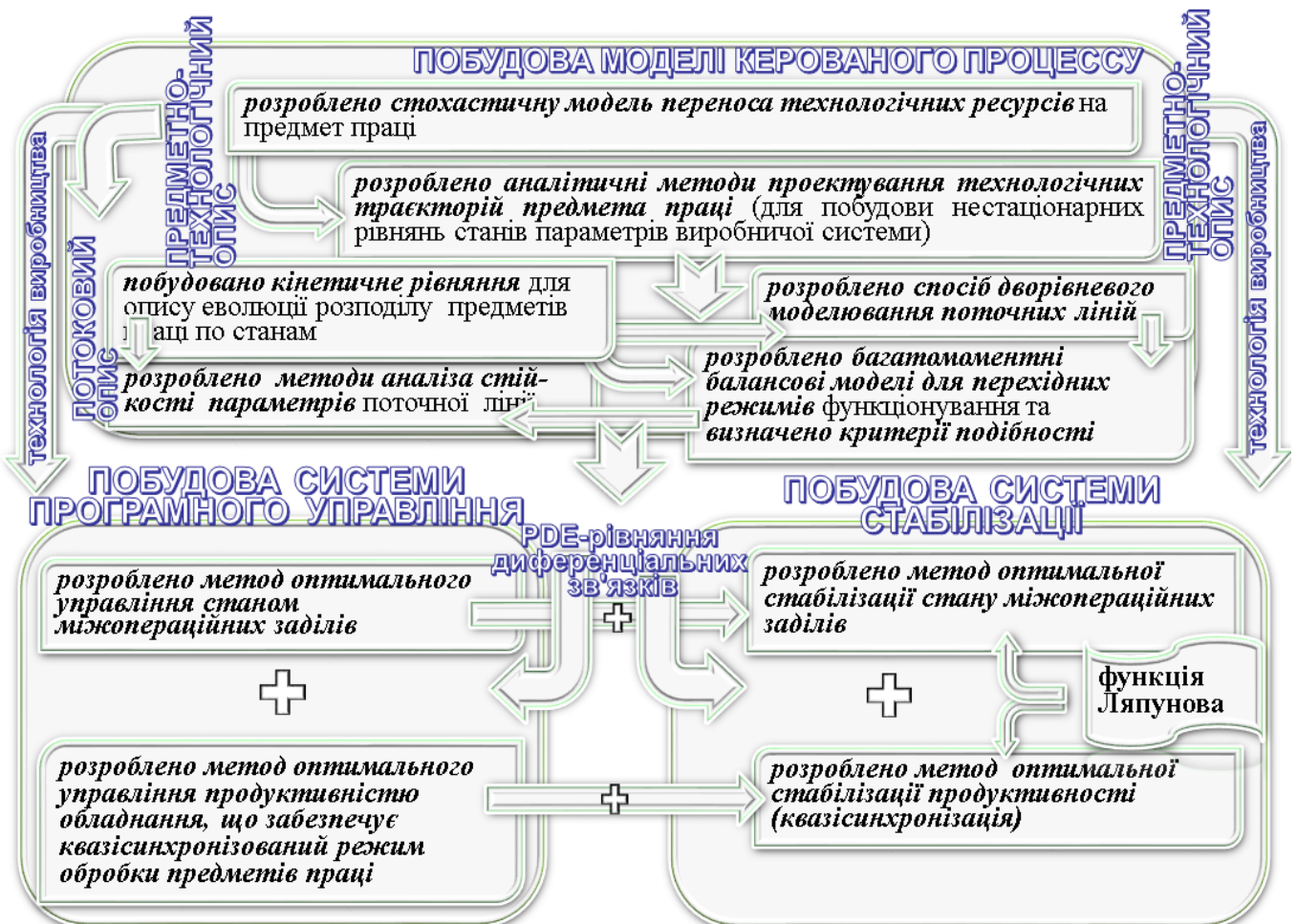


Рисунок 1- Напрями і структура дослідження

Другий розділ присвячено побудові предметно-технологічного опису керованого виробничого процесу, заданого послідовністю технологічних операцій з характеристиками обробки і нормативами споживання технологічних ресурсів.

Стан керованого процесу визначено як стан предметів праці. Геометричне місце точок у просторі, яке відповідає координатам послідовних станів предмета праці в технологічному перетворенні, є технологічною траєкторією $\vec{q}(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_j(t), \dots, q_n(t))$ (рис.2), визначається рівняннями стану предмета праці. Припущено, що у n -мірному просторі визначено метрику, що являє собою квадрат елемента довжини dG^2 між двома станами предмета праці $\vec{q}(t)$ і $\vec{q}(t) + d\vec{q}(t)$

$$(dG)^2 = \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n a_{\alpha,\beta} dq_{\alpha} dq_{\beta}, \tag{1}$$

де $a_{\alpha,\beta} = a_{\alpha,\beta}(q_1, q_2, \dots, q_n)$ - координатні функції технологічного простору. Серед варіантів їх вибору для виразу зручним при розгляді багаторесурсних задач управління поточним виробництвом є представлення координатних функцій таким чином, щоб припускалось наочне складання технологічних ресурсів різної розмірності. Функції $a_{\alpha,\beta}(q_1, q_2, \dots, q_n)$ обрано так, щоб представити величину dG як зміну вартості предмета праці між двома станами обробки. Подія, що відбувається з

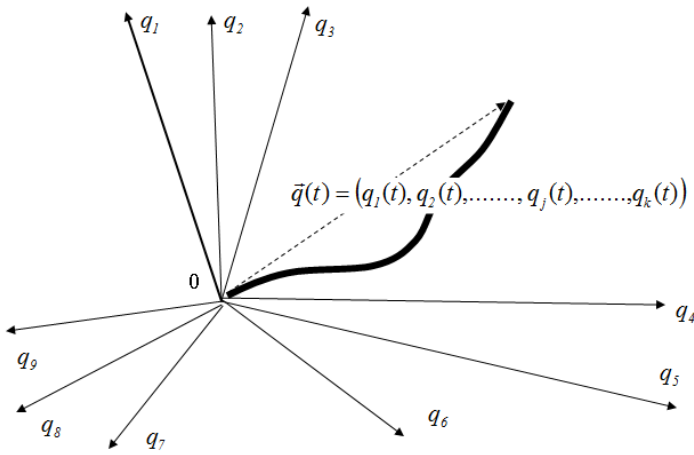


Рисунок 2- Координатний простір станів предметів праці

предметом праці в результаті технологічної обробки, визначається координатами $\vec{q}(t)$ n -мірного простору і моментом часу, коли воно відбулося. В момент часу t предмет праці, що був у стані з координатами $\vec{q}(t)$, переходить в момент часу $(t + dt)$ в точку з координатами $\vec{q}(t) + d\vec{q}(t)$. За час dt предмет праці пройшов шлях в координатному

просторі $\sqrt{\sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n a_{\alpha,\beta}(q_1, q_2, \dots, q_n) dq_{\alpha} dq_{\beta}}$.

З іншого боку, за час dt на предмети

праці в елементі об'єму, обмеженому координатами $\vec{q}(t)$ і $\vec{q}(t) + d\vec{q}(t)$, перенесено технологічні ресурси $\vec{\mu}_{\psi}(q_1, q_2, \dots, q_n) \cdot dt$ з інтенсивністю $\vec{\mu}_{\psi}(q_1, q_2, \dots, q_n)$. Припущено, що технологічний процес обробки предмета праці виконується згідно з нормативним конструкторським і технологічним параметрами з мінімальною втратою технологічних ресурсів. З урахуванням (1) рух предмета праці в координатному просторі (рис.2) по технологічному маршруту у відповідності з траєкторією, визначеною нормативною технологією виготовлення, між подіями «а» і «b» технологічної обробки, представлено мінімумом функціонала

$$\mathfrak{R}_{ab} = \int_a^b \left(\sqrt{\left(\vec{\mu}_{\psi}(q_1, q_2, \dots, q_n) \right)^2 - \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n a_{\alpha,\beta}(q_1, q_2, \dots, q_n) \frac{dq_{\alpha}}{dt} \frac{dq_{\beta}}{dt}} \right) dt \rightarrow \min. \tag{2}$$

З рівності нулю варіації $\delta \mathfrak{R}_{ab} = 0$ слідує рівняння Ейлера, що дають опис змін параметрів стану предмета праці в n -вимірному просторі (рис.2):

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial J}{\partial \dot{q}_\alpha} = \frac{\partial J}{\partial q_\alpha}, \quad \frac{dq_\alpha}{dt} = \dot{q}_\alpha, \quad J = \sqrt{\left(\bar{\mu}_\psi(q_1, q_2, \dots, q_n)\right)^2 - \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n a_{\alpha,\beta}(q_1, q_2, \dots, q_n) \dot{q}_\alpha \dot{q}_\beta}. \quad (3)$$

Підінтегральна функція (2) є цільовою функцією процесу виготовлення виробу у відповідності із заданою технологією. Для технологічного процесу, в міжопераційних напрацюваннях якого знаходиться N предметів праці, стан кожного з яких визначено вектором $\bar{q}_j(t)$, цільову функцію представлено у вигляді:

$$J(\bar{q}_1, \bar{q}_2, \dots, \bar{q}_n, \dot{\bar{q}}_1, \dot{\bar{q}}_2, \dots, \dot{\bar{q}}_n) = \sqrt{\sum_{j=1}^N \left(\left(\bar{\mu}_{\psi,j}(q_{j,1}, q_{j,2}, \dots, q_{j,n}) \right)^2 - \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n a_{\alpha,\beta}(q_{j,1}, q_{j,2}, \dots, q_{j,n}) \dot{q}_{j,\alpha} \dot{q}_{j,\beta} \right)}, \quad 1 < j \leq N.$$

З використанням цільової функції досліджено стан керованого виробничого процесу, в міжопераційних напрацюваннях якого знаходиться N предметів праці, з урахуванням обмежень і пріоритетів використання технологічних ресурсів. Для вирішення завдань управління потоковим виробництвом, параметрами в яких виступають міжопераційні напрацювання і продуктивність обробки предметів праці на операціях технологічного маршруту, в більшості практичних випадків з достатнім ступенем точності застосовано одноресурсне представлення виразу (1): $dS^2 = a(q) \cdot dq^2$, з використанням якого стан j -го предмета праці у фазовому просторі описано параметрами стану: вартістю перенесених технологічних ресурсів S_j (грн) та інтенсивністю їх перенесення на j -й предмет праці $\mu_j = \dot{S}_j$ (грн/год). Стан керованого виробничого процесу визначено параметрами стану предметів праці $(S_1, \mu_1), (S_2, \mu_2), \dots, (S_N, \mu_N)$ і цільовою функцією $J = J(t, S_1, \mu_1, S_2, \mu_2, \dots, S_N, \mu_N)$, а в будь-який інший момент часу знаходиться з рівняння виду (3):

$$\frac{\partial J}{\partial S_j} - \frac{d}{dt} \frac{\partial J}{\partial \mu_j} = 0, \quad J = \sqrt{\sum_{j=1}^N \left(\mu_{\psi,j}^2(S_j) - \mu_j^2 \right)}, \quad 0 < j \leq N, \quad (4)$$

з початковими умовами $S_j(t)|_{t=t_0} = S_{0j}$, $\mu_j(t)|_{t=t_0} = \mu_{0j}$, обмеження на ємність накопичувача розміром $N_{m\psi \text{ Max}}$ предметів праці $S_{j-N_{m\psi \text{ Max}}}(t) \geq S_j(t)$ та неможливості одночасної обробки 2-х предметів праці $S_{j-1}(t - \tau_{12}(S_j)) \geq S_j(t)$, $\tau_{12}(S_j)$ - ефективний час обробки предмета праці на позиції з координатою S_j . Якісні траєкторії перших двох предметів праці $S_1(t)$ і $S_2(t)$ при детермінованому характері перенесення технологічних ресурсів, отриманих в результаті розв'язання рівняння (4) з урахуванням вказаних обмежень на ємність накопичувачів і на мінімальний час обробки, представлено на рис.3. Стан параметрів обробки предмета праці залежить від стану параметрів сусідніх предметів праці. Для сучасних поточних ліній (Intel Corporation, Royal Philips и др.) характерним для технологічного процесу є велика кількість операцій $M \gg 1$, ($M \approx 10^2 \div 10^3$), в міжопераційних заділах яких знаходиться значна кількість предметів праці ($N_m \approx 10^4 \div 10^5$). Розв'язання системи рівнянь (4) для $N \gg 1$ в загальному випадку стохастичного перенесення технологічних ресурсів на предмет праці являє собою нездійсненне завдання навіть при використанні методів імітаційного моделювання. Але саме факт $N \gg 1$, $M \gg 1$ дає можливість здійснити перехід від предметно-технологічного опису

(мікроопису), що враховує технологію виробництва виробу і стохастичний характер перенесення технологічних ресурсів на предмет праці, до потокового опису (макроопису) з елементами ймовірнісної природи. Фазовий простір розбивається на комірки $\Delta\Omega = \Delta S \cdot \Delta\mu$ так, щоб розміри комірки $\Delta\Omega$ були набагато меншими характерних розмірів даної області фазового простору і в той же час утримували в собі велику кількість предметів праці. Замість того, щоб фіксувати точні значення параметрів предметів праці, стан керованого виробничого процесу приблизно визначено кількістю предметів праці в кожній комірці $\Delta\Omega$. Для опису стану керованого виробничого процесу в фазовому просторі (t, S, μ) введено фазову функцію розподілу $\chi(t, S, \mu)$ предметів праці по станам. Розв'язання кінетичного рівняння для введеної функції розподілу дало можливість побудувати багатомоментні балансові рівняння, що дозволяє визначити динаміку змін стану параметрів поточної лінії з урахуванням використаної технології виробництва і особливостей взаємодії предметів праці з обладнанням і між собою.

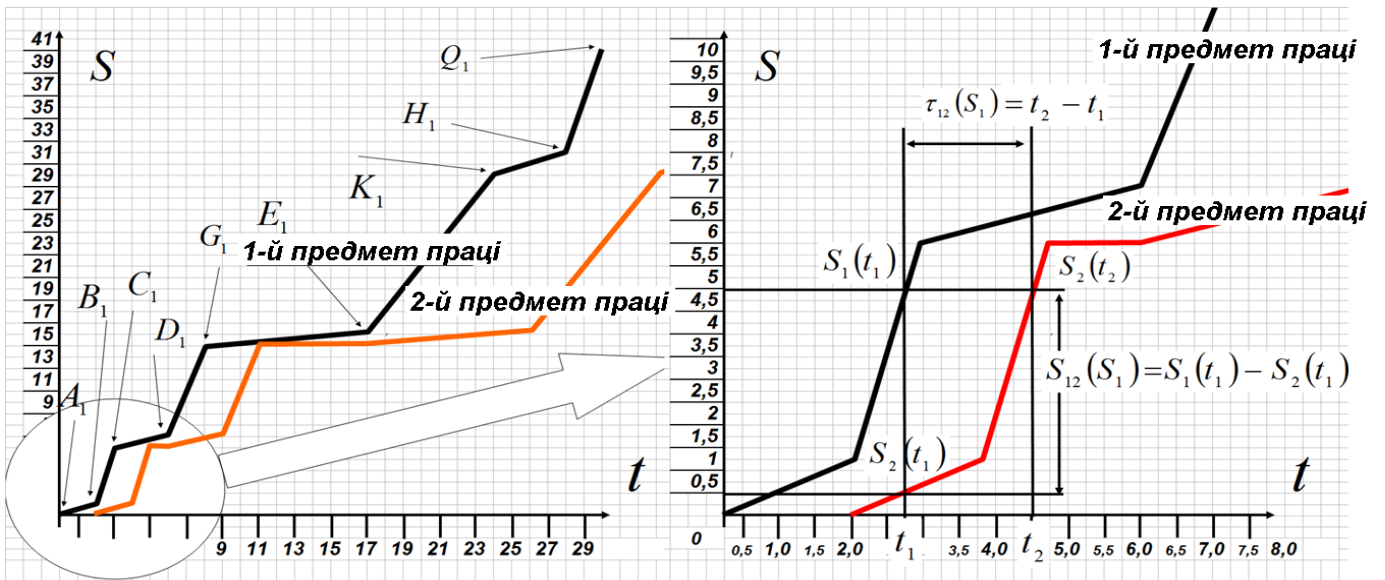


Рисунок 3 - Технологічні траєкторії руху сусідніх предметів праці

У **третьому розділі** розроблено моделі потокового опису (макрорівня опису) керованого виробничого процесу, структуру дослідження якого дано на рис. 4. Стан виробничого процесу представлено початковими моментами фазової функції розподілу $\chi(t, S, \mu)$ предметів праці по стану у фазовому просторі (t, S, μ) :

$$\int_0^{\infty} \int_0^{S_d} \chi(t, S, \mu) d\mu dS = N, \quad \int_0^{\infty} \mu^k \cdot \chi(t, S, \mu) d\mu = [\chi]_k(t, S), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

Умовою нормування фазової функції розподілу $\chi(t, S, \mu)$ (5) є закон збереження кількості предметів праці в керованому виробничому процесі. Суттєве значення в моделях макрорівня опису поточних ліній мають нульовий $[\chi]_0 = [\chi]_0(t, S)$ і перший $[\chi]_1 = [\chi]_1(t, S)$ моменти функції розподілу $\chi(t, S, \mu)$, які визначають густину розподілу предметів праці по технологічним позиціям і темп їх обробки. Кінетичне рівняння стохастичного керованого виробничого процесу в загальному вигляді є нелінійним інтегро-диференціальним рівнянням

$$\frac{\partial \chi(t, S, \mu)}{\partial t} + \frac{\partial \chi(t, S, \mu)}{\partial S} \mu + \frac{\partial \chi(t, S, \mu)}{\partial \mu} f(t, S) = \lambda_{plant}(t, S) \int_0^{\infty} \{ \varphi(t, S, \tilde{\mu}, \mu) \tilde{\mu} \cdot \chi(t, S, \tilde{\mu}) - \varphi(t, S, \mu, \tilde{\mu}) \mu \chi(t, S, \mu) \} d\tilde{\mu}, \quad (6)$$

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{[\chi]_{lv}(t, S)}{[\chi]_0(t, S)} \frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{[\chi]_{lv}(t, S)}{[\chi]_0(t, S)} \right) = f(t, S), \quad \mu = \frac{dS}{dt}. \quad (7)$$

В рівнянні (6) μ є усередненою по всім предметам праці, що знаходяться в комірці $d\Omega$ фазового простору з координатами $[S, S + dS]$, $[\mu, \mu + d\mu]$, інтенсивністю перенесення технологічних ресурсів на предмет праці, а похідна μ по часу (7) визначається усередненням рівняння Ейлера (4) по комірці $d\Omega$, вираженим через середній темп роботи технологічного обладнання $[\chi]_{lv}(t, S)$ і густину розподілу предметів праці по технологічним позиціям. Зміну функції розподілу $\chi(t, S, \mu)$ обумовлено стохастичним характером взаємодії предметів праці між собою та з обладнанням, розташованим повздовж технологічного маршруту з густиною $\lambda_{plant}(S)$. Ймовірність того, що в результаті впливу обладнання на предмет праці значення випадкової величини μ опиниться в межах $(\tilde{\mu}; \tilde{\mu} + d\tilde{\mu})$, є величина $\varphi(t, S, \mu, \tilde{\mu}) d\tilde{\mu}$. У більшості цікавих з практичної точки зору випадках густина розподілу $\varphi(t, S, \tilde{\mu}, \mu)$ з достатнім ступенем точності вважається не залежною від стану предметів праці до зазначання впливу з боку обладнання, що веде до спрощення (7):

$$\frac{\partial \chi(t, S, \mu)}{\partial t} + \frac{\partial \chi(t, S, \mu)}{\partial S} \mu + \frac{\partial \chi(t, S, \mu)}{\partial \mu} f(t, S) = \lambda_{plant}(t, S) \{ \varphi(t, S, \mu) [\chi]_{lv}(t, S) - \mu \chi(t, S, \mu) \}. \quad (8)$$

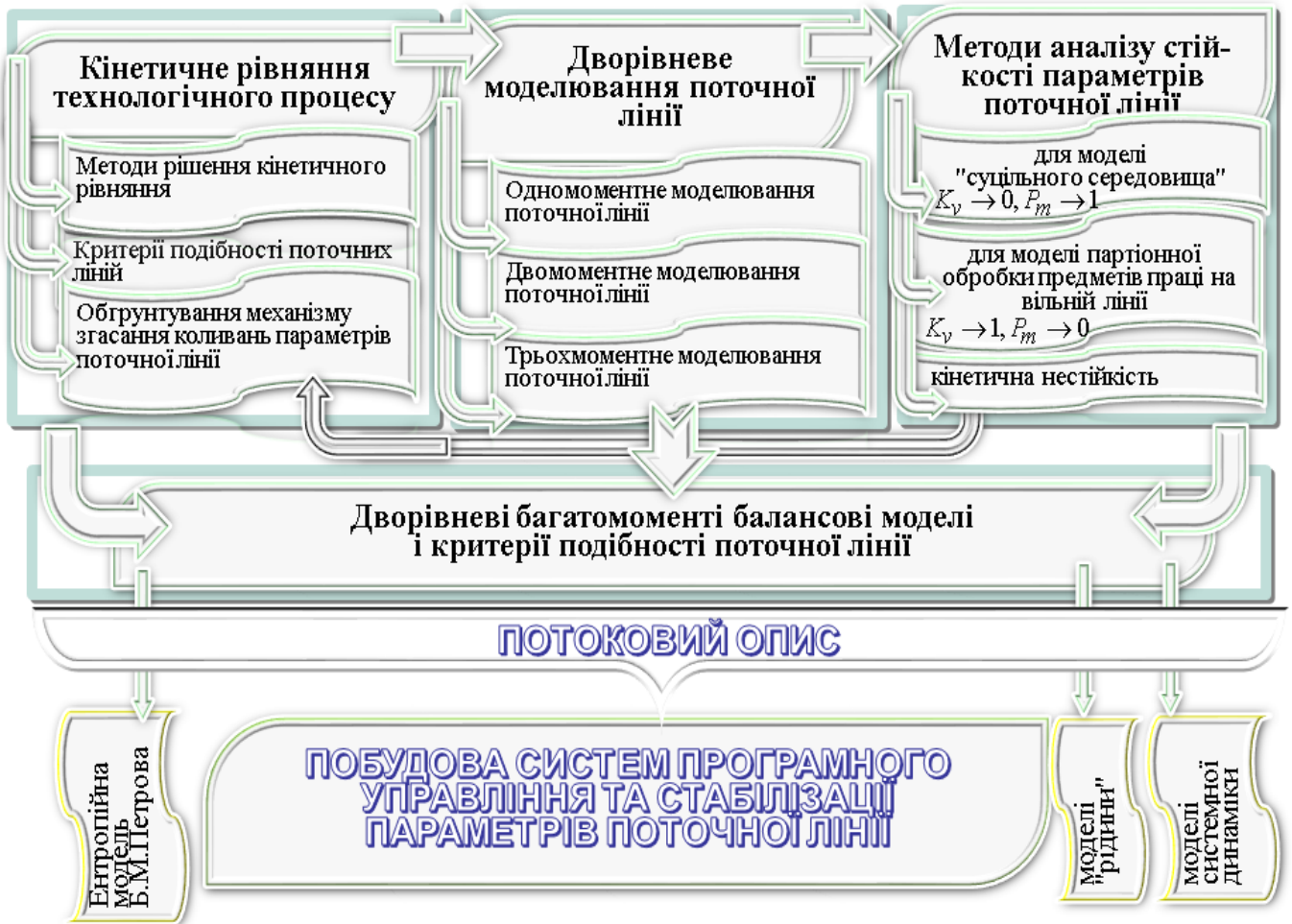


Рисунок 4 - Методи і моделі потокового опису

Важливим напрямом отриманих результатів є використання статистичного підходу для пояснення незворотності явищ, які відбуваються в ході функціонування виробничого процесу. Фактором, що призводить до незворотності, є нестійкість технологічних траєкторій предметів праці. Обґрунтування незворотності явищ, що відбуваються при русі предметів праці вздовж технологічного маршруту, отримано з використанням статистичного підходу, в якому ентропія визначається через кінетичне рівняння стану предметів праці. Беручи до уваги визначення для ентропії виробничого процесу виду $H_{\Omega} = \int_0^{\infty} \chi(t, S, \mu) \cdot \ln \left(\frac{e}{\chi(t, S, \mu)} \right) d\mu$ в моделі Б.М.Петрова, в якій

функцію розподілу предметів праці за станами визначено феноменологічно, використання кінетичного рівняння (8) дозволяє розширити області застосування моделі й аналітично обґрунтувати закон зростання ентропії. Зміна ентропії з часом визначається диференціюванням H_{Ω} за часом з урахуванням (8)

$$\frac{dH_{\Omega}}{dt} = -\frac{1}{2} \int_0^{\infty} \lambda_{plant}(t, S) \varphi(t, S, \mu) [\chi]_{\parallel}(t, S) \left\{ 1 - \frac{\mu \cdot \chi(t, S, \mu)}{\varphi(t, S, \mu) [\chi]_{\parallel}(t, S)} \right\} \ln \frac{\chi(t, S, \mu) \cdot \mu}{\varphi(t, S, \mu) [\chi]_{\parallel}(t, S)} d\mu \geq 0.$$

Інтеграл позитивний, що виражає закон зростання ентропії технологічного процесу. Знак рівності виконується при статистичній рівновазі. Незворотність явищ при русі предметів праці за технологічним маршрутом полягає у взаємодії предметів праці з обладнанням і між собою. Траєкторії руху предметів праці у фазовому просторі після взаємодії з обладнанням виявляються непередбачуваними. Можливо передбачити тільки найбільш ймовірну поведінку середніх характеристик виробничого процесу.

Із розв'язання кінетичного рівняння (8) впливає закон розподілу предметів праці за станами вздовж технологічного маршруту, що дозволило визначити числові характеристики (5): густину розподілу предметів праці в незавершеному виробництві $[\chi]_0(t, S)$ та темп обробки предметів праці на технологічних операціях $[\chi]_{\parallel}(t, S)$. Розв'язання рівнянь (6)-(8) пов'язане зі значними труднощами. Тому введено безрозмірні змінні $\hat{t} = (t/T_d)$, $\hat{S} = (S/S_d)$, $\hat{\mu} = (\mu/\mu_d)$ і безрозмірні характерні числа $K_v = (\tau_d/T_d)$, $P_m = (S_d/(T_d \mu_d))$, з урахуванням яких кінетичне рівняння (8) набуде вигляду

$$K_v \left[P_m \frac{\partial \chi}{\partial \hat{t}} + \frac{\partial \chi}{\partial \hat{S}} \hat{\mu} + P_m \frac{\partial \chi}{\partial \hat{\mu}} \frac{d\hat{\mu}}{d\hat{t}} \right] = \lambda_{plant} \tau_d [\chi]_{\parallel} \left\{ \varphi(t, S, \mu) - \frac{\mu \chi}{[\chi]_{\parallel}} \right\},$$

де τ_d і μ_d - характерні час обробки предмета праці та інтенсивність перенесення технологічних ресурсів для партії деталей із собівартістю S_d та періодом виробничого циклу T_d . Помноживши кінетичне рівняння на $1, \mu, \mu^2 \dots$ та проінтегрувавши по всьому діапазону зміни величини, отримали рівняння балансів для параметрів $[\chi]_k(t, S)$ (4) виробничого процесу (таблиця 1). Випадок $K_v \rightarrow 0$ відповідає керованому процесу з високою концентрацією предметів праці в міжопераційних заділах, а $K_v \rightarrow 1$ - обробці предметів праці без значного часу пролежування у міжопераційних накопичувачах. Параметр P_m визначає ступінь синхронізації операцій. Керований процес класифіковано у відповідності зі значеннями характерних чисел. Процеси, стан яких характеризується однаковими

характеристичними числами K_v , і описуються балансовими рівняннями одного і того ж виду, є подібними, мають загальні закономірності поведінки параметрів $[\chi]_k(t, S)$ (5). Для потокового опису руху предметів праці замкнуту систему в наближенні $K_v \ll 1$, $P_m \approx 1$ отримано методами теорії збурень з кінетичного рівняння (8):

при одномоментному описі:
$$\frac{\partial[\chi]_0}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_{1\nu}}{\partial S} = 0, \quad (9)$$

при 2-х моментному:
$$\frac{\partial[\chi]_0}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_1}{\partial S} = 0, \quad \frac{\partial[\chi]_1}{\partial t} + \frac{[\chi]_{1\nu}}{[\chi]_0} \frac{\partial[\chi]_1}{\partial S} = ([\chi]_{1\nu} - [\chi]_1) \frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{[\chi]_{1\nu}}{[\chi]_0} \right), \quad (10)$$

при 3-х моментному:
$$\frac{\partial[\chi]_0}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_1}{\partial S} = 0, \quad \frac{\partial[\chi]_1}{\partial t} + \frac{[\chi]_{1\nu}}{[\chi]_0} \frac{\partial[\chi]_1}{\partial S} = ([\chi]_{1\nu} - [\chi]_1) \frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{[\chi]_{1\nu}}{[\chi]_0} \right), \quad \frac{\partial[\chi]_2}{\partial t} + \left(\frac{[\chi]_{1\nu}}{[\chi]_0} \right)^2 \frac{\partial[\chi]_2}{\partial S} = 0. \quad (11)$$

Аналогічно введено замкнуту систему балансових рівнянь в наближенні за параметром $1/P_m \ll 1$ з використанням кінетичного рівняння (8) таблиці №1. Інтегрування балансових рівнянь (9)-(10) в межах протяжності ΔS_m технологічної ділянки $[S_{m-1}, S_m]$ дозволяє отримати рівняння системної динаміки і обґрунтувати область їх використання. В одномоментному описі рівняння (9) визначає систему рівнянь рівней системної динаміки Форрестера:

$$\frac{dN_m(t)}{dt} = [\chi]_{1\nu m-1} - [\chi]_{1\nu m}, \quad N_m(t) = \int_{S_{m-1}}^{S_m} [\chi]_0(t, S) dS, \quad m = 1, M.$$

Слід зауважити, що отримані рівняння не лише збігаються з відомими результатами, але й визначають умови їх застосування.

Важливим питанням при побудові моделей керованих виробничих процесів є визначення критеріїв і умов стійкості. Вплив малих збурюючих факторів не однозначно відбивається на протіканні виробничого процесу. Чинники, що збурюють, існують неминуче, тому задача стійкості для керованого виробничого

Таблиця 1. Балансові рівняння в моделях виробничого процесу

	$K_v \rightarrow 0$	$K_v \rightarrow 1$
	$G(t, S, \mu) = \lambda_{\text{плант}}(t, S) \{ \varphi(t, S, \mu) [\chi]_1(t, S) - \mu \chi(t, S, \mu) \}, \quad [\chi]_n = [\chi]_n(t, S), \quad n = 1, 2, \dots$	
$P_m \rightarrow 0$	$\frac{\partial[\chi]_n}{\partial S} = 0$	$\frac{\partial[\chi]_n}{\partial S} = \int_0^\infty \mu^{n-1} G(t, S, \mu) d\mu$
$P_m \rightarrow 1$	$\frac{\partial[\chi]_0}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_1}{\partial S} = 0,$ $\frac{\partial[\chi]_n}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_{n+1}}{\partial S} = n \cdot f(t, S) \cdot [\chi]_{n-1}$	$\frac{\partial[\chi]_0}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_1}{\partial S} = \int_0^\infty G(t, S, \mu) d\mu,$ $\frac{\partial[\chi]_n}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_{n+1}}{\partial S} = n f(t, S) [\chi]_{n-1} + \int_0^\infty \mu^{n-1} G(t, S, \mu) d\mu$
$P_m \rightarrow \infty$	$\frac{\partial[\chi]_n}{\partial S} = 0,$ $\frac{\partial[\chi]_n}{\partial t} = n \cdot f(t, S) \cdot [\chi]_{n-1}$	$\frac{\partial[\chi]_0}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_1}{\partial S} = \int_0^\infty G(t, S, \mu) d\mu,$ $\frac{\partial[\chi]_n}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_{n+1}}{\partial S} = \int_0^\infty G(t, S, \mu) \mu^{n-1} d\mu$

процесу набуває важливого практичного і теоретичного значення. Припущено, що система балансових рівнянь має незбурене рішення, яке відповідає нормативам виробничого процесу:

$$[\chi]_n(t, S) = [\chi]_n^*(t, S), \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

а спостережувані параметри отримують випадкові малі збурення

$$[y]_n(t, S) = [\chi]_n(t, S) - [\chi]_n^*(t, S). \quad (13)$$

Параметри технологічного обладнання та безпосередньо технології виробництва повільно змінюються з часом, що дає можливість припустити незалежність коефіцієнтів при $[y]_n(t, S)$ у рівняннях балансів від t . Малі збурення $[y]_n(t, S)$ розкладемо в ряд Фур'є з коефіцієнтами $\{y_n\}_0, \{y_n\}_j, [y_n]_j$:

$$[y]_n(t, S) = \{y_n\}_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \{y_n\}_j \sin[k_j S] + \sum_{j=1}^{\infty} [y_n]_j \cdot \cos[k_j S], \quad k_j = 2\pi \cdot j / S_d. \quad (14)$$

Рівняння балансів в двомоментному описі (10) у малих збуреннях при $K_v \ll 1, P_m \approx 1$

$$\begin{aligned} \frac{d\{y_0\}_0}{dt} = 0, \quad \frac{d\{y_0\}_j}{dt} - [y_1]_j k_j = 0, \quad \frac{d[y_0]_j}{dt} + \{y_1\}_j k_j = 0, \quad \frac{\partial\{y_1\}_0}{\partial t} + \{y_1\}_0 \frac{\partial B}{\partial S} + \{y_0\}_0 \frac{\partial(AB)}{\partial S} = 0, \\ \frac{\partial\{y_1\}_j}{\partial t} - [y_1]_j k_j B + \{y_1\}_j \frac{\partial B}{\partial S} - [y_0]_j k_j (AB) + \{y_0\}_j \frac{\partial(AB)}{\partial S} = 0, \quad B = \frac{[\chi]_{lv}}{[\chi]_0} \Big|_0, \quad (15) \\ \frac{\partial[y_1]_j}{\partial t} + \{y_1\}_j k_j B + [y_1]_j \frac{\partial B}{\partial S} + \{y_0\}_j k_j (AB) + [y_0]_j \frac{\partial(AB)}{\partial S} = 0, \quad A = \frac{[\chi]_{lv} - [\chi]_l}{[\chi]_0} \Big|_0 \end{aligned}$$

з відповідними характеристичними рівняннями:

$$\mathcal{G}_0 \cdot \left(\frac{\partial B}{\partial S} + \mathcal{G}_0 \right) = 0, \quad \mathcal{G}_j^2 + \mathcal{G}_j \left(\frac{\partial B}{\partial S} \pm i \cdot B \cdot k_j \right) + \left(k_j^2 (AB) \mp i \cdot k_j \frac{\partial(AB)}{\partial S} \right) = 0, \quad i = \sqrt{-1} \quad (16)$$

досліджені на стійкість за Ляпуновим. При від'ємності дійсної частини коренів $\mathcal{G}_0,$

\mathcal{G}_j технологічний процес стійкий, що накладає умову: $\frac{\partial B}{\partial S} > 0$. Система рівнянь (15)

має характеристичне рівняння (16) з нульовим коренем $\mathcal{G}_0 \equiv 0$, що є критичним

випадком і вимагає додаткової уваги. Для синхронізованого виробничого процесу

$\frac{\partial[\chi]_{lv}}{\partial S} \Big|_0 = 0$, умова $\frac{\partial B}{\partial S} > 0$ приймає вигляд $\frac{\partial[\chi]_0}{\partial S} \Big|_0 < 0$. Використовуючи кінетичне

рівняння (9) для синхронізованого виробничого процесу показано, що виникаючі

збурення параметрів $[\chi]_k(t, S)$ (6) є згасаючими. Для цього рівняння (9)

лінеаризовано відносно малих збурень χ_1 і $[y]_0$ функції розподілу $\chi_0 = \chi(t, S, \mu)$ і

густини $[\chi]_0$ розподілу предметів праці

$$\frac{\partial \chi_1}{\partial t} + \frac{\partial \chi_1}{\partial S} \mu - \frac{\partial \chi_0}{\partial \mu} \frac{B^3}{[\chi]_{lv}} \frac{\partial [y]_0}{\partial S} = -\lambda_{plant} \mu \chi_1. \quad (17)$$

Оскільки (17) лінійно та не містить координат у явному вигляді, то рішення

знаходиться у вигляді $\chi_{1j}(t, \mu) \cdot e^{ik_j S}, [y]_j(t) \cdot e^{ik_j S}, k_j = (2\pi j) / S_d$ з використанням

Фур'є-перетворень:

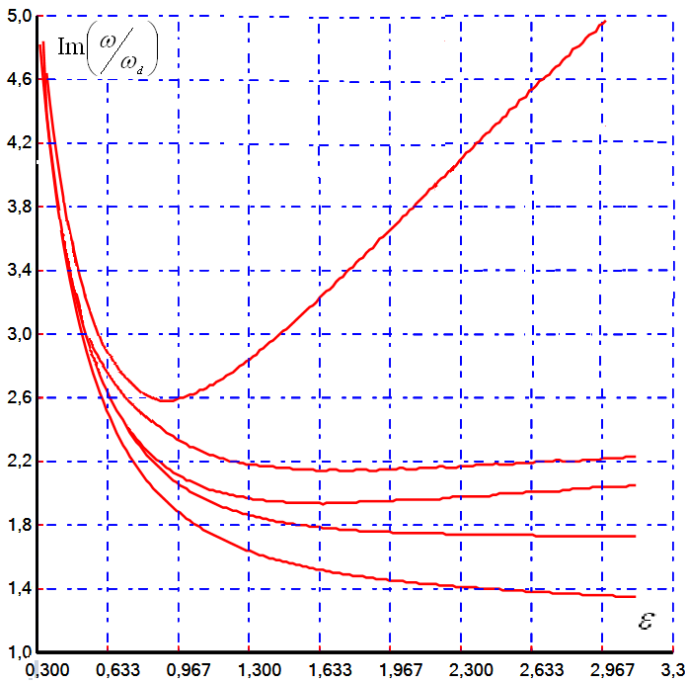


Рисунок 5 - Рішення дисперсійного рівняння

$$\chi_{1j}(t, \mu) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty+\sigma}^{\infty+\sigma} e^{-i\omega t} \chi_{1j\omega}(\mu) d\omega, \quad [y_j]_0(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty+\sigma}^{\infty+\sigma} e^{-i\omega t} [y_{j\omega}]_0 d\omega.$$

Вважаючи, що функція початкового збурення $\chi_{1j}(0, \mu)$ не має особливостей при кінцевих значеннях μ , асимптотика $[y]_0$ при великих t визначена нулями дисперсійного рівняння:

$$1 + i \cdot \varepsilon \left(1 + \nu^3 (\nu - 2 - p) \frac{p^{\nu-3} e^{-p}}{\Gamma(\nu)} \ln p \right) = 0, \quad \varepsilon = \frac{k_j}{\lambda_{Plant}},$$

$$p = \frac{2\pi\nu}{M} \frac{\omega}{\omega_d} \frac{(\varepsilon + i)}{(\varepsilon^2 + 1)}, \quad \Gamma(\nu) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{\nu-1} dt, \quad \omega_d = \frac{2\pi}{T_d},$$

що витікає з (17), яке задає залежність між ω і k_j (рис.5) для рівноважного

$$\text{розподілу виду } \chi_0 = [\chi_0]_{1\nu} \frac{\beta^\nu \mu^{\nu-2} e^{-\beta\mu}}{\Gamma(\nu)},$$

$$\text{де } \nu > 2, \beta > 0, B = \nu/\beta.$$

Асимптотичний закон спадання збурення густини міжопераційних заділів визначено виразом $[y_j]_0(t) \approx \exp(-\text{Im } \omega_k \cdot t)$, де ω_k корінь дисперсійного рівняння, найближчий до дійсної вісі. Для $\varepsilon = (\pi/100) = 0,03$ результати чисельних розрахунків (рис.5) дали можливість вирахувати характерний час спадання збурення густини предметів праці $\tau \approx 1..2$ тижні, який співпав з даними досліджень поточних ліній, представленими компанією Інтел у відкритому друку. Використання кінетичної моделі синхронізованої поточної лінії дозволяє обґрунтувати спадання збурень поточкових параметрів та визначити їх власні частоти коливань.

У четвертому розділі у загальному вигляді сформульовано і розв'язано проблему визначення оптимального управління станом міжопераційних заділів $[\chi]_0(t, S)$ і темпом обробки $[\chi]_1(t, S)$ предметів праці. Розроблено метод побудови програмного керування параметрами поточною лінією, що враховує всі операції технологічного маршруту. При цьому якість отриманого програмного керування залежить як від точності моделі виробничого процесу, так і від вибору методу, що використовується для побудови програми управління.

Потік заготовок $[\chi]_1(t, 0)$ на першу технологічну операцію задано програмою поставок сировини і матеріалів, вихід продукції $[\chi]_1(t, S_d)$ - збутовою програмою підприємства (рис.6). Прийнято допущення, що у початковий момент часу на технологічних операціях виконується обробка предметів праці попередньої партії, які розподілено по міжопераційним заділам у відповідності з видом функції $[\chi]_0(0, S)$. Темп обробки $[\chi]_1(t, S)$ для кожної технологічної операції несинхронізованої поточної лінії задано. Знайдено оптимальну програму управління станом параметрів $[\chi]_0(t, S) \in G_0$, $[\chi]_1(t, S) \in G_1$ поточної лінії за проміжок часу $t \in [0, T_d]$ для позицій технологічного маршруту $S \in [0, S_d]$ при управлінні $Y(t, S) \in G_Y$

продуктивністю обладнання на кожній ділянці m -ї технологічної операції, що надає мінімум функціоналу

$$\int_0^{T_d} \int_0^{S_d} (Y_1(t, S) \cdot \omega_{Y_1}(t, S) + Y_0(t, S) \cdot \omega_{Y_0}(t, S)) dS dt \rightarrow \min, \quad (18)$$

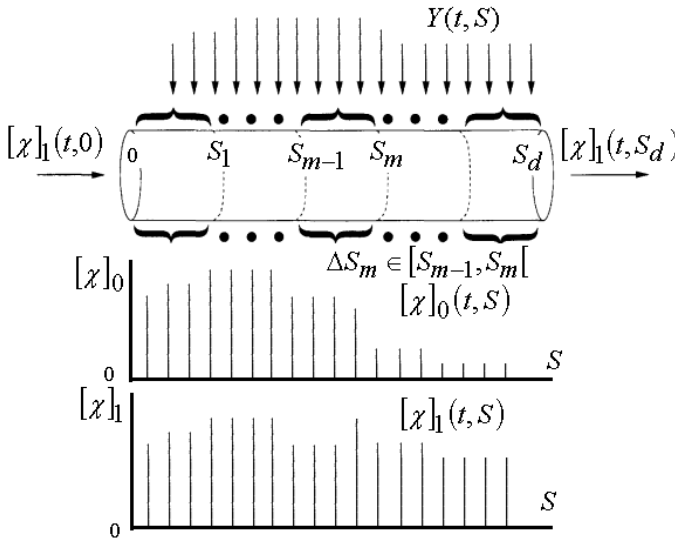


Рисунок 6 - Схема поточної лінії з розподіленим програмним управлінням

який характеризує витрати ресурсів при диференційних зв'язках:

$$\frac{\partial [\chi]_0(t, S)}{\partial t} + \frac{\partial [\chi]_1(S)}{\partial S} = - \frac{\partial Y_1(t, S)}{\partial S} - Y_0(t, S),$$

$$[\chi]_1(t, S) = [\chi]_{1\psi}(t, S), \quad (19)$$

при обмеженнях вздовж траєкторії на фазові змінні $[\chi]_0(t, S)$, визначені ємністю накопичувачів:

$$0 \leq [\chi]_0(t, S), \quad [\chi]_0(t, S) \leq [\chi]_{0G}(S), \quad (20)$$

обмеженнях на керування :

$$0 \leq Y(t, S), \quad Y(t, S) + [\chi]_1(t, S) \leq [\chi]_{1G}, \quad (21)$$

$$Y(t, S) = \int_0^S Y_0(t, \zeta) d\zeta + Y_1(t, S),$$

початкових умовах: $[\chi]_0(0, S) = [\chi]_{00}(S), \quad (22)$

кінцевому стані (мета управління)

$$[\chi]_0(T_d, S) = [\chi]_{0T_d}(S) \quad (23)$$

і граничних умовах:

$$[\chi]_1(t, 0) = [\chi]_{1\psi}(0); \quad [\chi]_1(t, S_d) = [\chi]_{1\psi}(S_d), \quad (24)$$

де функції $\omega_{Y_0}(t, S)$, $\omega_{Y_1}(t, S)$, характеризують витрати технологічних ресурсів для здійснення управління $Y_0(t, S)$, $Y_1(t, S)$. Застосовано відомі принципи управління темпом обробки: зміна технологічних режимів для підвищення продуктивності обробки; включення резервного обладнання в місці технологічного маршруту з координатою $S \in [0, S_d]$; використання основного обладнання в додатковий позаурочний час. Структурну схему системи управління виробничим процесом представлено на рис.7.

Для визначення оптимальної програми управління міжопераційними заділами виробничої лінії розкладаємо функції $Y(t, S)$, $[\chi]_0(t, S)$, $[\chi]_1(S)$ в ряд Фур'є на проміжку $S \in [0, S_d]$:

$$Y_0(t, S) = Y_{00}(t), \quad Y_1(t, S) = \sum_{j=1}^{\infty} \{Y\}_j \sin[k_j S] + \sum_{j=1}^{\infty} [Y]_j \cos[k_j S], \quad k_j = \frac{2\pi \cdot j}{S_d}, \quad j=1.. \infty.$$

$$[\chi]_n(t, S) = \{\chi_n\}_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \{\chi_n\}_j \sin[k_j S] + \sum_{j=1}^{\infty} [\chi_n]_j \cos[k_j S], \quad n=0,1,$$

з коефіцієнтами розкладення $\{Y\}_0, \{Y\}_j, [Y]_j, \{\chi_0\}_0, \{\chi_0\}_j, [\chi_0]_j, \{\chi_1\}_0, \{\chi_1\}_j, [\chi_1]_j$, з урахуванням яких критерій якості (22) представим у вигляді

$$\int_0^{T_d} \left(\omega_{00} \cdot Y_{00}^2 + \frac{\omega_{01}}{2} \sum_{j=1}^{\infty} \{Y\}_j^2 + \frac{\omega_{01}}{2} \sum_{j=1}^{\infty} [Y]_j^2 \right) dt \rightarrow \min. \quad (25)$$

Подібним чином записані вирази для обмежень на фазові змінні і на

управління, а також початкові умови (22), мета управління (23) і граничні умови (24). З урахуванням розкладання $Y(t, S)$, $[\chi]_0(t, S)$, $[\chi]_1(S)$ в ряд Фур'є балансове рівняння (19), що визначає поведінку потокових параметрів, представимо системою незалежних рівнянь:

$$\frac{d\{\chi_0\}_0}{dt} = -Y_{00}, \quad \frac{d\{\chi_0\}_j}{dt} - k_j[\chi_1]_j = k_j[Y]_j, \quad \frac{d[\chi_0]_j}{dt} + k_j\{\chi_1\}_j = -k_j\{Y\}_j. \quad (26)$$

З урахуванням виду цільового функціоналу (25), що визначає якість процесу управління, і диференціальних зв'язків (26), для досліджуваної системи функція Понтрягіна

$$H = -\psi_0 Y_{00} - \omega_{00} Y_{00}^2 + \sum_{j=1}^{\infty} \left(\psi_{sj} k_j ([Y]_j + [\chi_1]_j) - \psi_{cj} k_j (\{Y\}_j + \{\chi_1\}_j) - \omega_{01} \frac{1}{2} \{Y\}_j^2 - \omega_{01} \frac{1}{2} [Y]_j \right) \quad (27)$$

представлена через коефіцієнти розкладення $\{Y\}_0, \{Y\}_j, [Y]_j, \{\chi_0\}_0, \{\chi_0\}_j, [\chi_0]_j, \{\chi_1\}_0, \{\chi_1\}_j, [\chi_1]_j$ і сполучені функції $\psi_0, \psi_{sj}, \psi_{cj}$. Управління, при якому досягається максимум функції Лагранжа, побудованої виходячи з виду функції Гамільтона (27), визначено з системи рівнянь:

$$-\psi_0 - 2\omega_{00} \cdot Y_{00} = 0, \quad -\psi_{cj} \cdot k_j - \omega_{01} \{Y\}_j = 0, \quad \psi_{sj} \cdot k_j - \omega_{01} [Y]_j = 0, \quad (28)$$

якщо його значення знаходиться всередині інтервалу зміни управління, або з (21), якщо перебуває за його межами. В результаті підстановки (28) в (26) отримано систему рівнянь для визначення фазової траєкторії і управління з умов додаткової нежорсткості, визначених виразом (20). Сполучені функції $\psi_0, \psi_{sj}, \psi_{cj}$ можуть змінювати знак один раз на траєкторії, відповідної обмеженню. Отже, точка перемикання знаходиться за межами інтервалу управління. Систему рівнянь (26) розв'язано щодо сполучених функцій:

$$\psi_0 = 2\omega_{00} \frac{\{\chi_{0Td}\}_0 - \{\chi_0\}_{00}}{T_d}, \quad \psi_{sj0} = \frac{\omega_{01}}{k_j^2} \left(\frac{\{\chi_{0Td}\}_j - \{\chi_0\}_{j0}}{T_d} - k_j [\chi_1]_j \right), \quad \psi_{cj0} = \frac{\omega_{01}}{k_j^2} \left(\frac{[\chi_{0Td}]_j - [\chi_0]_{j0}}{T_d} + k_j \{\chi_1\}_j \right),$$

що дозволяє отримати коефіцієнти розкладення

$$Y_{00} = -\frac{\{\chi_{0Td}\}_0 - \{\chi_0\}_{00}}{T_d}, \quad \{Y\}_j = -\frac{[\chi_{0Td}]_j - [\chi_0]_{j0}}{k_j \cdot T_d} - \{\chi_1\}_j, \quad [Y]_j = \frac{\{\chi_{0Td}\}_j - \{\chi_0\}_{j0}}{k_j \cdot T_d} - [\chi_1]_j, \quad (29)$$



Рисунок 7 - Структурна схема програмного керування параметрами поточної лінії

які задають вид функції оптимального програмного керування з необхідною точністю, визначеною кількістю доданків ряду (28). Константи інтегрування $\{\chi_0\}_{00}, \{\chi_0\}_{j0}$ і $[\chi_0]_{j0}$ визначено з початкової умови (22) і мети управління (23).

Запропонований метод з використанням дворівневої моделі керованого процесу дозволяє будувати програмне управління виробничим процесом, в якому функція управління визначається для кожної технологічної позиції, вимагаючи при цьому значно меншої кількості обчислювальних ресурсів у порівнянні з методами, що використовують для опису об'єкта управління розповсюджені дискретно-подієві моделі, моделі масового обслуговування і рідини.

У п'ятому розділі в загальному вигляді сформульовано і вирішено проблему оптимальної стабілізації стану міжопераційних заділів і темпу обробки предметів праці. Структурну схему системи стабілізації параметрів керованого виробничого процесу представлено на рис.8. Основна задача стабілізації параметрів виробничого процесу полягає у формуванні керуючих впливів, що забезпечують стале функціонування параметрів виробничих процесів. Якість результату стабілізації залежить як від точності моделі керованого виробничого процесу, так і від вибору методу, що використовується для розрахунку програми управління. Для розрахунку оптимального управління використані балансові рівняння (10), доповнені функціями управління $Y_n(t, S)$. Параметри керованого виробничого процесу отримують випадкові малі збурення $[y]_n(t, S)$ (13), для ліквідації яких потрібні керуючі впливи $u_m(t, S)$, що забезпечують асимптотичну стійкість параметрів виробничого процесу.

Прикладні задачі стабілізації параметрів виробничих процесів поряд з вимогами асимптотичної стійкості стану технологічного процесу містять побажання щодо найкращої якості перехідного процесу до незбуреного стану, які полягають у вимозі мінімуму витрат технологічних ресурсів (енергії, сировини і матеріалів, трудових ресурсів і т.д.), витрачених на формування впливів $u_m(t, S)$, що задано інтегралом виду:

$$I = \int_{t_0}^{\infty} \left[\frac{1}{S_d} \int_0^{S_d} \left(\sum_{n,m=0}^{N_n} \alpha_{nm} [y]_n [y]_m + \sum_{n,m=0}^{N_n} \beta_{nm} u_m u_n \right) dS \right] dt, \quad (30)$$

$$u_m = \{u_m\}_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \{u_m\}_j \sin[k_j S] + \sum_{j=1}^{\infty} [u_m]_j \cos[k_j S], \quad k_j = \frac{2\pi \cdot j}{S_d}. \quad (31)$$

Оптимальну функцію Ляпунова представлено у вигляді квадратичної форми

$$V^0(t, \{y_n\}_0, \{y_n\}_j, [y_n]_j) = \sum_{n,m=0}^{N_n} c_{n,m} \left(\{y_n\}_0 \{y_m\}_0 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} \{y_n\}_j \{y_m\}_j + \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} [y_n]_j [y_m]_j \right). \quad (32)$$

Диференціюючи вираз $B[V^0, t]$

$$B[V^0, t] = \frac{\partial V^0}{\partial t} + \sum_{n=0}^{N_n} \frac{\partial V^0}{\partial \{y_n\}_0} \frac{d\{y_n\}_0}{dt} + \sum_{n=0}^{N_n} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\partial V^0}{\partial \{y_n\}_j} \frac{d\{y_n\}_j}{dt} + \sum_{n=0}^{N_n} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\partial V^0}{\partial [y_n]_j} \frac{d[y_n]_j}{dt} + \omega \quad (33)$$

за $\{u_m\}_0, \{u_m\}_j, [u_m]_j$ і прирівнюючи результати нулю, отримаємо рівняння для визначення оптимальних керуючих впливів $u_m = u_m^0(t, S)$:

$$\frac{\partial B[V^0, t]}{\partial \{u_n\}_0} = 0, \quad \frac{\partial B[V^0, t]}{\partial \{u_n\}_j} = 0, \quad \frac{\partial B[V^0, t]}{\partial [u_n]_j} = 0, \quad (34)$$

які розв'язуються відносно $\{u_m\}_0$, $\{u_m\}_j$, $[u_m]_j$:

$$\begin{aligned} \{u_m\}_0 &= -\frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N_n} \frac{\Delta_{km}}{\Delta} \sum_{n=0}^{N_n} \frac{\partial V^0}{\partial \{y_n\}_0} \frac{\partial}{\partial \{u_k\}_0} \left[\frac{d\{y_n\}_0}{dt} \right], & \{u_m\}_j &= -\frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N_n} \frac{\Delta_{km}}{\Delta} \sum_{n=0}^{N_n} \frac{\partial V^0}{\partial \{y_n\}_j} \frac{\partial}{\partial \{u_k\}_j} \left[\frac{d\{y_n\}_j}{dt} \right], \\ [u_m]_j &= -\frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N_n} \frac{\Delta_{km}}{\Delta} \sum_{n=0}^{N_n} \frac{\partial V^0}{\partial [y_n]_j} \frac{\partial}{\partial [u_k]_j} \left[\frac{d[y_n]_j}{dt} \right], \end{aligned} \quad (35)$$

де Δ_{km} - алгебраїчне доповнення елемента k -го рядка та m -ої колонки, Δ - визначник системи (34). Якщо форма (32) виявиться додатно визначеною, то задачу оптимальної стабілізації параметрів керованого виробничого процесу розв'язано.

На практиці завдання стабілізації параметрів виробничих процесів зведено до управління страховими міжопераційними заділами і темпом руху предметів праці. Система двохмоментних балансових рівнянь при управлінні відхиленнями параметрів через величину міжопераційних заділів має вигляд:

$$\frac{\partial [y]_0}{\partial t} + \frac{\partial [y]_1}{\partial S} = q_{00} u_0, \quad \frac{\partial [y]_1}{\partial t} + \frac{\partial [y]_1}{\partial S} B + [y]_1 \frac{\partial B}{\partial S} + \frac{\partial [y]_0}{\partial S} AB + [y]_0 \frac{\partial (AB)}{\partial S} = 0.$$

Відхилення заділів $[\chi]_0$ компенсуються зовнішніми джерелами або страховими заділами з заданою інтенсивністю. За критерій якості управління обрано

$$I = \int_{t_0}^{\infty} \left(\alpha \left(\{y_0\}_0^2 + \frac{1}{2} \{y_0\}_1^2 + \frac{1}{2} [y_0]_1^2 \right) + \beta \left(\{u_0\}_0^2 + \frac{1}{2} \{u_0\}_1^2 + \frac{1}{2} [u_0]_1^2 \right) \right) dt, \quad \alpha = const > 0, \quad \beta = const > 0.$$

Функцію Ляпунова знайдено у вигляді квадратичної форми

$$V^0(t, [y]_n) = \frac{1}{S_d} \int_0^{S_d} c_0 [y]_0^2 dS = c_0 \left(\{y_0\}_0^2 + \frac{1}{2} \{y_0\}_1^2 + \frac{1}{2} [y_0]_1^2 \right).$$

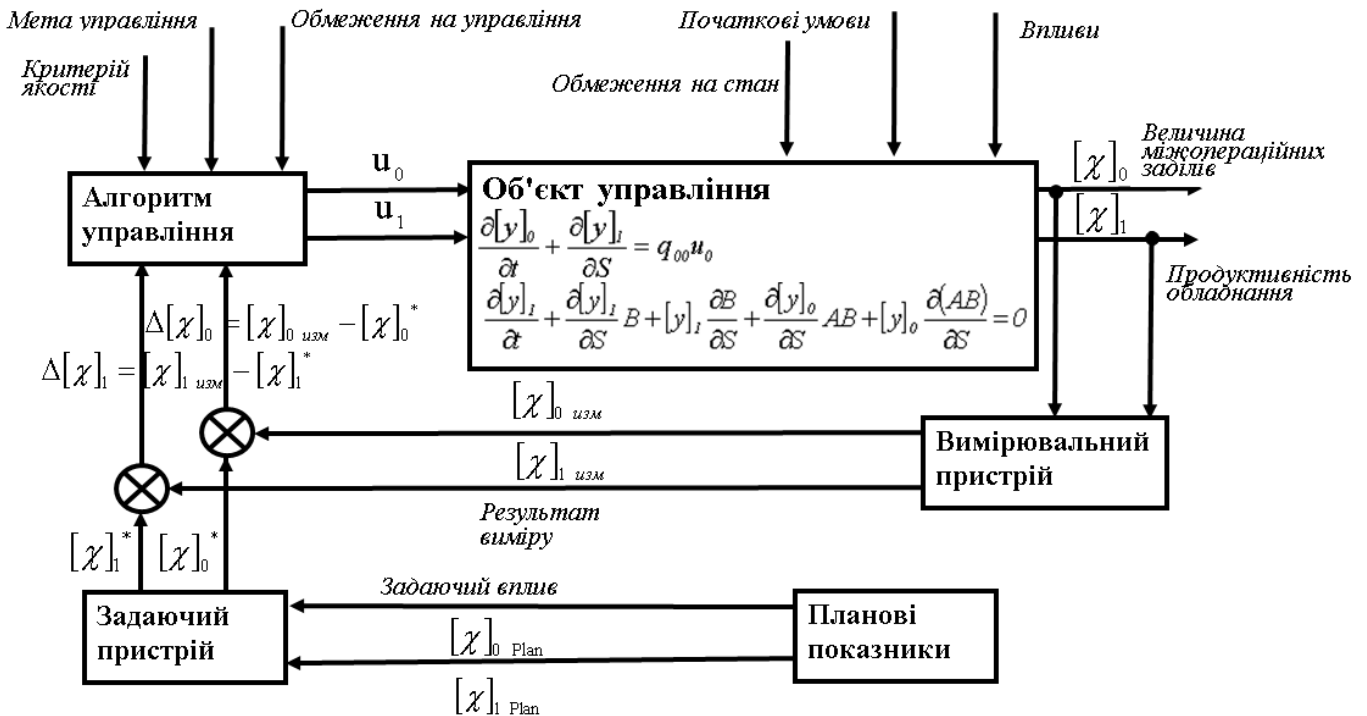


Рисунок 8 - Структурна схема оптимальної стабілізації параметрів поточної лінії

Коефіцієнти розкладання (31) для визначення оптимального керуючого впливу приймають вигляд:

$$\{u_0\}_0 = -\frac{c_0 q_{00}}{\{\beta\}_0} \{y_0\}_0, \quad \{u_0\}_1 = -\frac{c_0 q_{00}}{\{\beta\}_0} \{y_0\}_1, \quad [u_0]_l = -\frac{c_0 q_{00}}{[\beta]_0} [y_0]_l. \quad (36)$$

Коефіцієнт c_0 визначено з рівняння $B[V^0, t]=0$.

Система рівнянь для випадку управління виробничим процесом через темп руху предметів праці має вигляд:

$$\frac{\partial [y]_0}{\partial t} = -\frac{\partial [y]_l}{\partial S} - q_{01} u_1, \quad \frac{\partial [y]_l}{\partial t} = -\frac{\partial [y]_l}{\partial S} B - [y]_l \frac{\partial B}{\partial S} - q_{11} u_1.$$

Відхилення темпу руху предметів праці $[\chi]_l$ від планової величини компенсується внутрішніми джерелами. Підприємство несе витрати у вигляді оплати понаднормових робіт або оплати простою. Критерієм якості оперативного управління виробничим процесом є мінімум інтеграла

$$I = \int_{t_0}^{\infty} \frac{1}{S_d} \int_0^{S_d} (\alpha u_1^2) dS dt. \quad (37)$$

Рівняння управління параметрам виробничого процесу для нульової гармоніки збурень $[y]_n$ макропараметрів $[\chi]_n$ та керуючого впливу u_1 має вигляд:

$$\frac{\partial \{y_0\}_0}{\partial t} = q_{01} \{u_1\}_0, \quad \frac{\partial \{y_1\}_0}{\partial t} + \{y_1\}_0 \left\{ \frac{\partial B}{\partial S} \right\}_0 = q_{11} \{u_1\}_0. \quad (38)$$

Функцію Ляпунова представлено квадратичною формою:

$$V^0(t, [y]_n) = \frac{1}{S_d} \int_0^{S_d} (c_0 ([y]_0)^2 + c_1 \cdot ([y]_l)^2) dS = c_0 \{y_0\}_0^2 + c_1 \{y_1\}_0^2, \quad \frac{\partial V^0}{\partial t} = 0.$$

Систему (38) розв'язано щодо $\{u_1\}_0$:

$$\{u_1\}_0 = \frac{1}{2q_{11}} \left\{ \frac{\partial B}{\partial S} \right\}_0 \{y_1\}_0, \quad c_0 = 0, \quad c_1 = \frac{\alpha}{2q_{11}^2} \left\{ \frac{\partial B}{\partial S} \right\}_0,$$

що визначає умови існування оптимального керування:

$$\left. \frac{\partial [\chi]_{lv}}{\partial S} \right|_0 \cong 0, \quad \left\{ \frac{\partial B}{\partial S} \right\}_0 = [\chi]_{lv}|_0 \frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{1}{[\chi]_0} \right) \Big|_0 > 0$$

для критерію якості оперативного управління виробничим процесом (37). Достатні умови розв'язності задачі про визначено-позитивність форми (32) визначено рангом матриці $W = \{Q, Q \cdot B_j\}$, де Q - матриця $\{q_{nm}\}$, B_j - матриця коефіцієнтів при $\{y_n\}_0$, $\{y_n\}_j$, $[y_n]_j$ у рівняннях балансів в малих збуреннях.

Запропонований метод стабілізації параметрів керованого виробничого процесу дозволяє поряд з вимогою асимптотичної стійкості стану міжопераційних заділів і темпу обробки предметів праці для кожної технологічної позиції забезпечити найкращу якість процесу переходу від збуреного стану параметрів до незбуреного при мінімальній витраті технологічних ресурсів, що використовуються для ліквідації наявних збурень.

У шостому розділі представлено результати експериментальних та імітаційних досліджень застосування розроблених методів для проектування систем оптимального програмного управління та оптимальної стабілізації параметрів виробничих процесів.

За допомогою розробленого методу розрахунку програмного керування отримані функції управління для виробничого процесу, в якості моделі якого прийнято квазістатичну модифіковану PDE-модель M/M/1 черги і запропоновану в роботі для опису перехідних процесів дворівневу PDE-модель (11). Квазістатична модифікована PDE-модель M/M/1 черги:

$$\frac{\partial [\chi]_0(t, S)}{\partial t} + \frac{\partial F(t, S)}{\partial S} = 0, \quad F(t, S) = [\chi]_0(t, S) \nu(t, S), \quad \nu(t, S) = \frac{\mu_{out}}{[\chi]_0(t, S) + M/S_d},$$

де μ_{out} - темп руху предмета праці на виході з поточної лінії, використана зарубіжними дослідниками для аналізу параметрів поточної лінії, що працює в сталому режимі. Результати імітаційного експерименту наведено на рис.9.

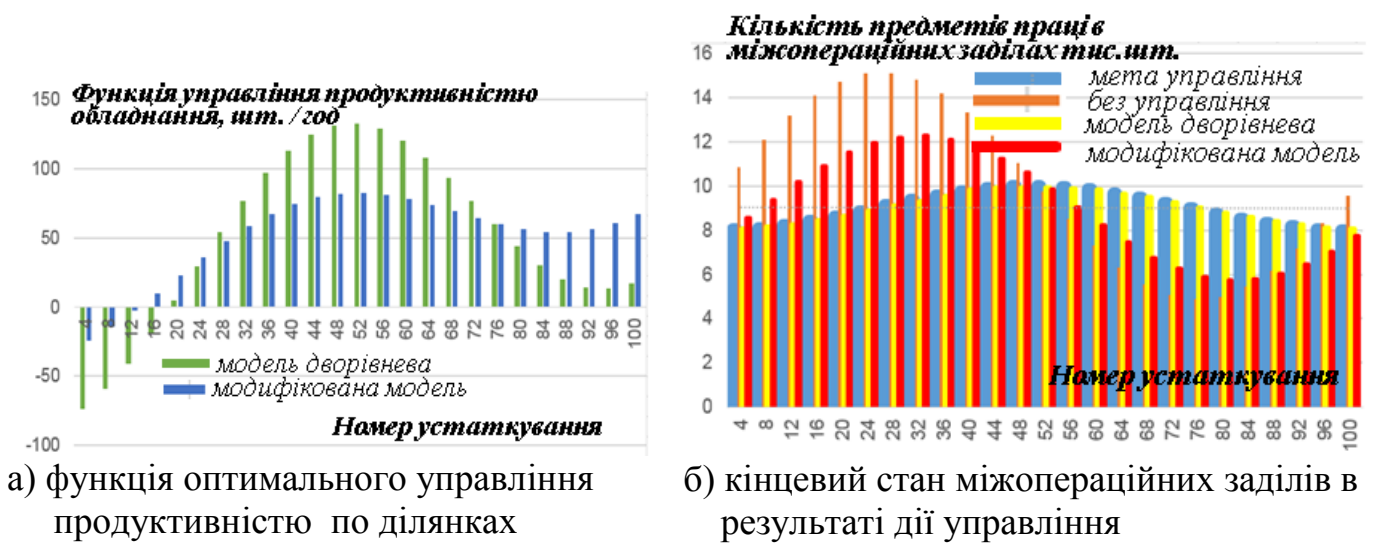


Рисунок 9 - Порівняльний аналіз моделей керованого виробничого процесу

Показано, що використання функції управління (рис.9.а) моделлю керованого об'єкта, при побудові якої виступала дворівнева PDE-модель (10), дало прийнятну збіжність кінцевого стану міжопераційних заділів з їх станом, визначеним метою управління (рис.9.б). Відхилення результатів склало 2%, що пояснюється похибкою наближеного рішення, представленого у вигляді обмеженої кількості членів ряду розкладання функції. У той же час, використання функції управління поточною лінією (рис.9.а), побудованої із застосуванням квазістатичної модифікованої PDE-моделі M/M/1 черги, дає незадовільні результати. Значні відхилення кінцевого результату у великій кількості проведених експериментів від мети управління (рис.9.б), підтверджує опубліковані висновки зарубіжних дослідників про непридатність використання квазістатичних моделей для опису перехідних режимів.

Важливе прикладне значення має побудова систем управління параметрами поточних ліній для забезпечення синхронізованого режиму роботи. На рис.10 представлено поведінку параметрів керованого виробничого процесу, функціонуючого в квазісинхронізованому режимі, програма управління параметрами якого побудована за допомогою дворівневої PDE-моделі (10). В якості характерного часу синхронізації продуктивності устаткування використовується

проміжок часу, рівний тривалості робочої зміни. На рис.10.а показана динаміку стану міжопераційних заділів для окремої технологічної позиції, яка характеризує квазісінхронізованій режим роботи поточної Лінії, відповідає програмному оптимальному управлінню (рис.10.б.), що визначає режим роботи технологічного обладнання для зазначеної технологічної позиції. Перехідний режим відповідає початковому періоду обробки партії предметів праці на технологічній позиції і періоду завершення, коли партія предметів праці закінчує обробку.

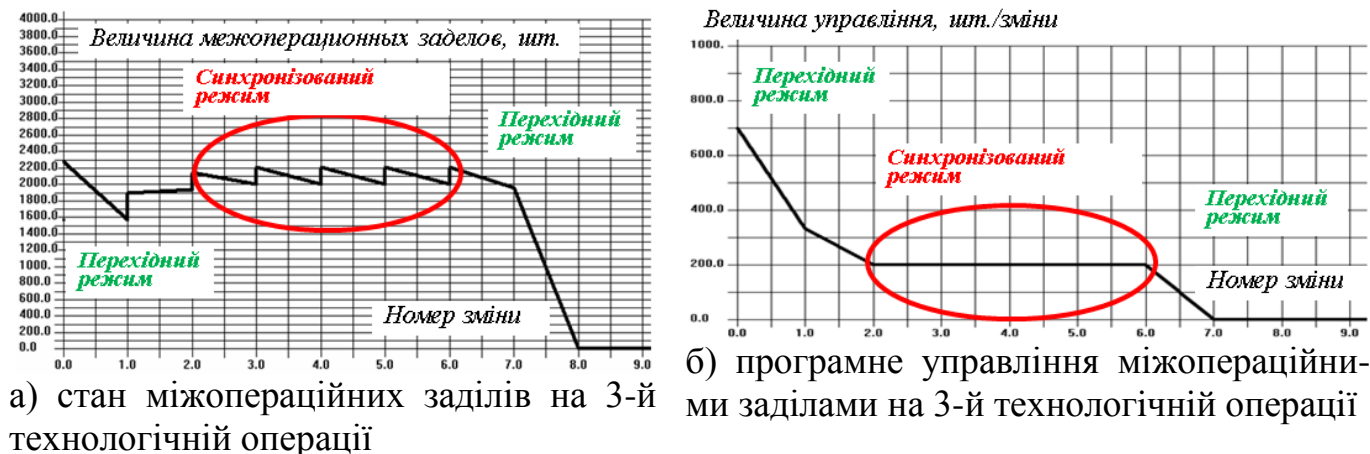


Рисунок 10 - Квазісінхронізація керованого виробничого процесу

Результати практичної реалізації системи оптимальної стабілізації параметрів поточної лінії представлено на рис.11. З використанням критерію стійкості (16) визначено технологічні операції з нестійким станом міжопераційних заділів. Рис.11.а. демонструє експериментальні дані для динаміки величини відхилення міжопераційних заділів від планового стану. Криві відповідають спостереженням в різні робочі зміни. Для ліквідації наявних на виробництві збурень використовувалося управління виду (38), яке забезпечувало ліквідацію зовнішніх збурень (рис.11.б) для нормального протікання виробничого процесу.

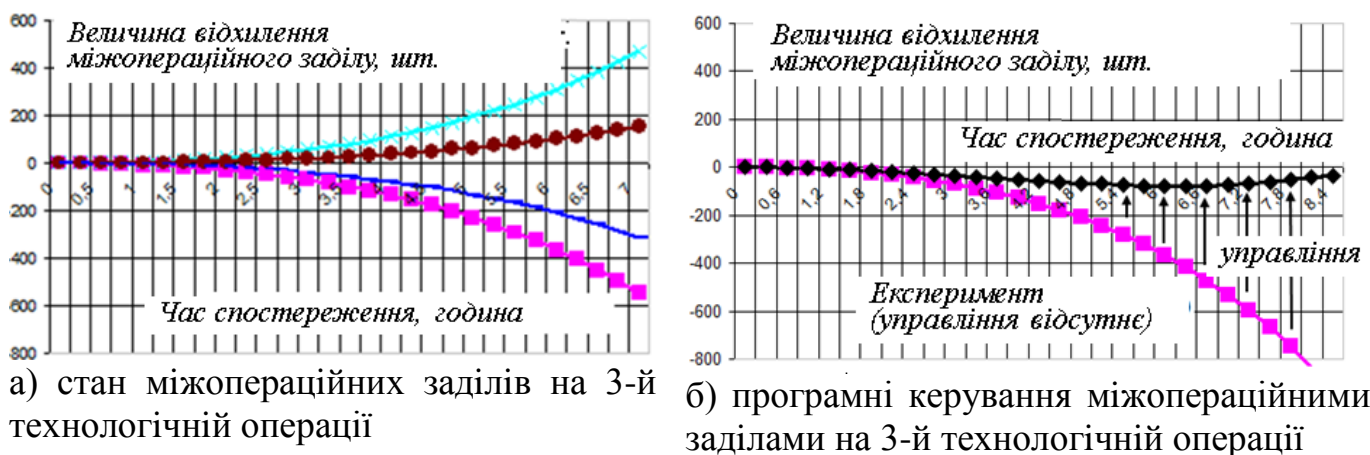


Рисунок 11 - Стабілізація величини міжопераційних заділів керованого виробничого процесу

Таким чином, запропоновані моделі об'єктів управління і побудовані на їх основі системи оптимального програмного керування та оптимальної стабілізації

забезпечили стійке функціонування потокового виробництва для перехідних несталих режимів при заданому критерії якості протікання перехідного процесу.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну проблему проектування ефективних систем управління виробничими лініями, які функціонують в перехідних неусталених режимах на підприємствах з поточним способом організації виробництва. Розроблено концептуальні положення і теоретичні основи статистичної теорії такого класу систем управління.

Отримано такі основні результати:

1. На основі виконаного аналізу традиційно вживаних моделей керованого виробничого процесу встановлено, що характерною їх особливістю є те, що вони побудовані на фундаменті квазістатичного опису, що не дозволяє їх використовувати для проектування ефективних систем управління поточними лініями в перехідних режимах. Подальше їх використання пов'язане із завданням виведення нестационарних рівнянь стану для параметрів поточних ліній, побудовою багатомоментних замкнутих балансових PDE-рівнянь, що описують їх стан для перехідних режимів, і розробкою на їх основі дворівневих моделей управління. Для вирішення існуючих проблем сформульовано концепцію статистичного підходу до побудови моделей виробничих поточних ліній, в якій у порівнянні з традиційними підходами характеристики керованого виробничого процесу визначаються через модельні уявлення про стохастичний механізм впливу обладнання на предмет праці і взаємодію предметів праці між собою, що дозволяє побудувати нові й обґрунтувати існуючі макромоделі управління, визначити точність опису та межі його застосування.

2. Побудовано предметно-технологічний опис виробничого процесу, заснований на законах збереження, що характеризують процес перенесення технологічних ресурсів на предмет праці, і просторово-часовій структурі технологічного процесу. Показано, що параметри керованого виробничого процесу є статистичними величинами, поведінку яких у загальному випадку обумовлено стохастичними процесами переносу технологічних ресурсів на предмет праці. Стан параметрів виробничого процесу визначається станом параметрів великої кількості предметів праці, що знаходяться в різній стадії обробки на операціях уздовж технологічного маршруту. Для виведення нестационарних рівнянь стану параметрів поточної лінії, що функціонує у перехідних режимах, отримано рівняння руху предметів праці. Записано перші інтеграли динамічної виробничої системи, обґрунтовано їх фізичний та виробничо-технологічний зміст. Проаналізовано обмеження, що накладаються на траєкторії предметів праці технологією виробництва. Аргументовано показано, що рівняння DES-моделі поточної лінії є скінченно-різницевиими рівняннями предметно-технологічної моделі.

3. Розроблено спосіб дворівневого моделювання поточної лінії, заснований на кінетичному описі технологічного процесу, що на відміну від відомих моделей дозволило врахувати технологію виробництва виробів та стохастичні процеси впливу технологічного обладнання на предмет праці та процеси взаємодії предметів праці між собою. Отримано кінетичне рівняння виробничого процесу, яке

використане в якості основного апарату аналізу та синтезу розроблених статистичних систем управління потоковим виробництвом. Показано, що розв'язання кінетичного рівняння для поточної лінії з багатоопераційним технологічним процесом, у міжопераційному доробку операцій якого міститься велика кількість предметів праці, може бути знайдено методами теорії збурень. Отримано критерії подібності керованих виробничих процесів, використання яких дозволяє визначити загальні закономірності поведінки параметрів різних виробничих процесів.

4. Отримано умови стійкості процесу управління за Ляпуновим для параметрів поточної лінії у двохмоментному описі. Визначено співвідношення між міжопераційними заділами і темпом обробки предметів праці, яке забезпечує стійке функціонування керованого виробничого процесу. Критерії стійкості параметрів керованого виробничого процесу може бути використано для побудови моделей управління запасами підприємства.

5. Отримано оптимальне управління станом межопераційних заділів для перехідних режимів функціонування поточної лінії у вигляді функції, що залежить від часу і технологічної позиції поточної лінії. Показано, що застосування багатомоментних балансових рівнянь при проектуванні систем управління параметрами поточної лінії дозволяє порівняно з дискретно-подієвими моделями і моделями рідини значно зменшити розмірність системи рівнянь, що використовуються для опису функціонування поточної лінії.

6. Доведено, що в розробленій багатомоментній моделі оптимальної стабілізації стану міжопераційних заділів поточної лінії в якості рівнянь зв'язків виступає лінеарізована система рівнянь в малих збуреннях. У моделі керуючі дії визначено з умов стійкості керованого виробничого процесу, що дало можливість, з одного боку, значно скоротити витрати технологічних ресурсів, які витрачаються підприємством на формування керуючих впливів для усунення відхилень, з іншого боку, підвищити стабільність випуску продукції підприємства. Використовуючи метод функцій Ляпунова, отримано вид оптимальної функції управління параметрам поточної лінії. Показано, що розроблена багатомоментна модель оптимальної стабілізації продуктивності технологічних ділянок забезпечує квазісинхронізацію темпу обробки предметів праці обладнанням уздовж технологічного маршруту і стійке функціонування лінії для перехідних режимів. Розглянуто прикладні задачі управління параметрами, які поряд з вимогами асимптотичної стійкості планового стану містять побажання про можливу найкращу якість перехідного процесу до незбуреного стану. При цьому забезпечено виконання побажань про можливі найменші витрати технологічних ресурсів, які використовуються на формування керуючих впливів. Встановлено умови, при яких задача про оптимальне управління макропараметрам технологічного процесу має єдине рішення.

7. Удосконалено метод побудови рівнянь рівнів і темпу для мережі матеріальних потоків, який обґрунтовує вибір виду рівнянь системної динаміки для розглянутого керованого виробничого процесу через модельні уявлення про властивості предмета праці і механізм стохастичного впливу обладнання на предмет. Отримано рівняння системної динаміки Форрестера, які використано для опису виробничо-збутових систем, вказано межі їх застосовності і точність опису.

Показано, що рівняння системної динаміки Форрестера є агрегованими рівняннями макрорівня, що описують стан поведінки предметів праці.

8. Отримала подальший розвиток динамічна ентропійна модель опису керованого виробничого процесу. Для визначення ентропії виробничого процесу використано кінетичне рівняння, записане на основі модельного уявлення про стан предмета праці. Аналітично обґрунтовано закон зростання ентропії виробничого процесу і показано механізм незворотності явищ, що відбуваються.

9. Розроблені в дисертації моделі, механізми та методи використано в процесі підготовки та прийняття управлінських рішень на підприємствах НВФ «Технологія» (м.Харків), АТ «Новий Стиль» (м.Харків), ТОВ «Харківський завод профілегибочного обладнання» (м.Харків), ТОВ «Імперія металів.»(м.Харків), що підтверджується відповідними актами та довідками. Запропоновані методи і моделі, а також алгоритми і програми, розроблені для їх реалізації, використовуються в навчальному процесі Національного технічного університету «ХПІ» в дисциплінах, спрямованих на вивчення методів організації, планування і управління виробництвом.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пигнастый О. М. Теория предприятия: Устойчивость функционирования массового производства и продвижения продукции на рынок / В. П. Демуцкий, В. С. Пигнастая, О. М. Пигнастый – Харків: ХНУ, 2003. – 272 с.

Здобувачем виконано розділи 1, 2, 4. У розділі №1 виконано огляд методів і моделей прийняття управлінських рішень; у розділі №2 розроблено моделі предметно-технологічного, кінетичного і потокового опису підприємств з масовим випуском продукції; у розділі №4 описано методику побудови управління виробничим процесом на прикладі машинобудівного підприємства.

2. Пигнастый О. М. Статистическая теория производственных систем / О. М. Пигнастый. - Харків: ХНУ, 2007. - 388 с.

3. Пигнастый О. М. Совершенствование технологии сварки трубчатых деталей, имеющих гальванопокрытие. / Н.М.Тарасов, О.М.Пигнастый // – Авиационно-космическая техника и технология. - Харьков: ГАУ “ХАИ”. -1999. - № 10. С. 262-264.

Здобувачем удосконалено технології виготовлення тонкостінних зварювальних виробів та проведено аналіз експериментальних досліджень поведінки параметрів технологічного процесу контактного зварювання, за результатом якого було розроблено методику, що дозволила підвищити продуктивність поточної лінії в два рази і знизити в три рази витрати на виготовлення.

4. Пигнастый О. М. Стохастическое описание экономико-производственных систем с массовым выпуском продукции / В. П. Демуцкий, В. С. Пигнастая, О. М. Пигнастый // Доповіді Національної академії наук України. - Київ: Видавничий дім "Академперіодика". - 2005. - № 7. - С. 66-71.

Здобувачем побудовано математичну модель керованого виробничого процесу підприємства з масовим випуском продукції. Введено функцію розподілу по станах предметів праці. З використанням кінетичного опису отримано балансові рівняння для параметрів поточної лінії.

5. Пигнастый О. М. Об устойчивости функционирования процессов массового производства / В. П. Демуцкий, О. М. Пигнастый, С. Ю. Мелешенко, Е. Н. Пищик //

Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - Харьков: НАКУ. - 2005. - С. 206-215

Здобувачем визначено параметри поточної лінії, при яких технологічні операції функціонують у сталому режимі. Для двохмоментного наближення функціонування поточної лінії записано рівняння в малих збуреннях і досліджено їх стійкість.

6.Пігнастий О. М. Мікроскопічний метод автоматизованого опису соціально-економічних систем в АПК / О. М. Пігнастий // Вестник Харьковського національного технічного університета сільського господарства. - Харьков: ХНТУСГ. - 2005. - № 37. - С. 191-196.

7.Пігнастий О. М. Інженерно-производственная функция предприятия с серийным или массовым выпуском продукции / О. М. Пігнастий // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. - Харьков: НАКУ. - 2005. - № 42(3). - С. 111-117.

8.Пігнастий О. М. Об особенностях построения моделей, описывающих функционирование производственных систем авиационно-космической промышленности / О. М. Пігнастий // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. - Харьков: НАКУ. - 2005. - № 43(4). - С. 120-136.

9.Пігнастий О. М. Вопросы устойчивости макроскопических параметров технологических процессов массового производства / В. П. Демуцкий, О. М. Пігнастий // Доповіді Національної академії наук України. - Київ: Видавничий дім "Академперіодика". - 2006. - № 3. - С. 63-67.

Здобувачем розроблено методи аналізу стійкості потокових параметрів лінії для перехідних і усталених режимів функціонування підприємства з масовим випуском продукції.

10.Пігнастий О. М. Задача оптимального оперативного управления макропараметрами производственной системы с массовым выпуском продукции / О. М. Пігнастий // Доповіді Національної академії наук України. - Київ: Видавничий дім "Академперіодика". - 2006. - №5 - С. 79-85.

11.Пігнастий О. М. Характерные числа в моделях описания производственных систем / О. М. Пігнастий // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - Харьков: НАКУ. - 2006. - № 31. - С. 242-252

12.Пігнастий О. М. О построении целевой функции производственной системы / О. М. Пігнастий // Доповіді Національної академії наук України. - Київ: Видавничий дім "Академперіодика". - 2007. - №5. - С. 50-55.

13.Pignasty O. M. Distinctive numbers of production systems functioning description / O. M. Pignasty // Вопросы атомной науки и техники. - Харьков: ННЦ ХФТИ. - 2007. - №3 - С. 322-325.

14.Пігнастий О. М. Расчет производственного цикла с применением статистической теории производственно-технических систем / О. М. Пігнастий, В. Д. Ходусов // Доповіді Національної академії наук України. - Киев: Видавничий дім "Академперіодика". - 2009. - №12. - С. 38-44

Здобувачем розроблено метод розрахунку виробничого циклу виготовлення партії виробів, заснований на предметно-технологічному описі виробничого процесу.

15.Пігнастий О. М. К вопросу обеспечения асимптотической устойчивости макропараметров технологического процесса / О. М. Пігнастий // Математичне моделювання. - Дніпродзержинськ: ДДТУ. - 2010. - №2 (23). - С. 25-31.

16.Пигнастый О. М. О соотношении между макропараметрами технологического процесса, обеспечивающем устойчивое функционирование производственно-технической системы / О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. - Харків: ХНУ. - 2010. - №890. - С. 178-186.

Здобувачем розроблено спосіб дворівневого моделювання виробничої лінії, що враховує стохастичний характер впливу технологічного обладнання на предмети праці та процеси взаємодії предметів праці між собою

17.Пигнастый О. М. Основы статистической теории моделирования технологических процессов / О. М. Пигнастый // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – Київ: КНУТД. - 2010. -№ 55. - С. 225-229

18.Пигнастый О. М. Об использовании статистического метода при описании технологических процессов производственно-технических систем/ О. М. Пигнастый, Т. В. Меркулова // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. -Луганск: СУНУ. - 2010.-№150. - С. 204-209.

Здобувачем обґрунтовано необхідність застосування статистичного підходу для опису поточного виробництва

19.Пигнастый О. М. К вопросу подобия технологических процессов производственно-технических систем / Н. А. Азаренков, О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // Доповіді Національної академії наук України. - Київ: Видавничий дім "Академперіодика". - 2011. –№2– С. 29-35.

Здобувачем розроблено багатомоментні балансові моделі для сталих і перехідних режимів функціонування поточної лінії та визначено критерії подібності поточних ліній

20.Пигнастый О. М. Энтропийный подход к описанию технологических процессов / О. М. Пигнастый, В. Я. Заруба // - Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. -Луганск: СУНУ. - 2011. - №156 - С. 219-225.

Здобувачем представлено основні положення ентропійного підходу до опису виробничих систем

21.Пигнастый О. М. Теоретические основы моделирования технологических процессов / О. М. Пигнастый // Весник Херсонського національного технічного університету. Херсон: ХНТУ. - 2011. - №3. - С. 348-354

22.Пигнастый О. М. Применение статистического подхода в моделях оптимального управления инвестициями производственно-технической и эколого-экономической систем / О. М. Пигнастый // - Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. -Луганск: СУНУ. - 2012. –№2. - С. 396-401

23.Пигнастый О. М. О законе возрастания энтропии технологического процесса / Н. А. Азаренков, О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // Доповіді Національної академії наук України. - Київ: Видавничий дім "Академперіодика". - 2012. -№5 - С. 32-37.

Здобувачем доповнено та вдосконалено ентропійну модель управління параметрами технологічного процесу Б.М.Петрова.

24.Пигнастый О. М. Статистическое обоснование энтропийных закономерностей в моделях управления технологическими процессами / О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. - Харків: ХНУ. - 2012. № 1037. - С. 168-174.

Здобувачем викладено статистичне обґрунтування ентропійних закономірностей в моделях управління технологічними процесами.

25.Пигнастый О. М. Основы статистической теории построения континуальных моделей производственных линий // О. М. Пигнастый // Східноєвропейський журнал передових технологій. Харків: НВП “Технологічний центр”. - 2014. - № 3 (70). - С. 38 – 48.

26.Пигнастый О. М. Использование PDE-моделей для построения единой теории производственных линий / О. М. Пигнастый // Вісник Херсонського національного технічного університету. Херсон: ХНТУ. - 2014. - № 3 (50). - С. 405 –412.

27.Пигнастый О. М. Макроскопические уравнения для описания экономико-производственной системы с массовым выпуском продукции / В. П. Демуцкий, В. С. Пигнастая, О. М. Пигнастый // – Вісник Харківського національного університету. - Харків: ХНУ. -2005. - № 664. - С. 107-112.

Здобувачем розроблено багатомоментні балансові рівняння, що характеризують поведінку параметрів поточної лінії для сталих і перехідних режимів функціонування.

28.Пигнастый О. М. Использование методов статистической физики для исследования экономико-производственных систем с массовым выпуском продукции / В. П. Демуцкий, О. М. Пигнастый, М. Н. Азаренкова // Вісник Харківського національного університету. - Харків: ХНУ. -2005. - № 710. Сер. ”Фізична”, вип. 2. - С. 128-134

Здобувачем побудовано математичну модель економіко-виробничих систем з масовим випуском продукції. Введено функцію розподілу для базового продукту і для неї записано кінетичної рівняння, що є аналогом кінетичного рівняння у фізиці. Для замкнутої системи рівнянь стану макропараметрів виробничої системи отримано рівняння збуреного стану.

29.Пигнастый О. М. Применение методов статистической физики для описания стационарного функционирования производственных систем / В. П. Демуцкий, О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов, М. Н. Азаренкова // - Вісник Харківського національного університету. - Харків: ХНУ. - 2006. -N732. Сер. ”Фізична”. - С.79-86.

Здобувачем записано замкнуту систему рівнянь стану параметрів потокового виробництва. Одержано умови стійкості функціонування параметрів.

30.Пигнастый О. М. О вариационном и дифференциальном принципах построения функции Лагранжа производственной системы / С. Н. Новак, О. М. Пигнастый // Проблеми і перспективи розвитку банківської системи України. - Суми: ДВНЗ “УАБС НБУ”. - 2006. -№17. - С. 120-130.

Здобувачем розроблено аналітичні методи проектування технологічних траєкторій предмета праці в просторі станів для побудови нестационарних рівнянь стану параметрів виробничої системи.

31.Пигнастый О. М. Целевая функция производственной системы с массовым выпуском продукции / В. П. Демуцкий, О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов, М. Н. Азаренкова // - Вісник Харківського національного університету. - Харків: ХНУ. - 2006. - N746. Сер. ”Фізична” - С.95-103.

Здобувачем введено цільовий функціонал і побудовано цільову функцію виробничої системи. Отримано рівняння Ейлера для базового продукту.

32.Пигнастый О. М. Формула успеха: семь принципов построения системы управления качеством / О. М. Пигнастый // - Оборудование и инструмент для профессионалов. Харків: Enter-Inform. - 2007. - №3 - С.54-56.

33.Пигнастый О. М. О теоретических подходах в построении функции Лагранжа производственной системы / В. П. Демуцкий, О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // Вісник Харківського національного університету. - Харків: ХНУ. - 2007. -N781. - С. 99-106.

Здобувачем досліджено різні підходи до виведення функції Лагранжа, які може бути покладеної в основу методу проектування технологічних траєкторій предмета праці в просторі станів для побудови нестационарних рівнянь стану параметрів виробничої системи.

34.Пигнастый О. М. Теория функционирования производственного процесса с серийным и массовым выпуском продукции / В. П. Демуцкий, О. М. Пигнастый // Математичні моделі та інформаційні технології в сучасній економіці. - Суми: ДВНЗ "УАБС НБУ". - 2007. - С. 62-94.

Здобувачем розроблено модель управління параметрами поточної лінії для серійного типу виробництва

35.Пигнастый О. М. Использование статистической теории производственно-технических систем для расчета производственного цикла изготовления продукции / В. Г. Михайленко, Н. П. Дидиченко, А. А. Дубровин, В. П. Демуцкий, О. М. Пигнастый // - Вісник Харківського національного університету. - Харків: ХНУ. -2009. -N851 Сер. "Економічна". - С.195-203

Здобувачем розроблено метод розрахунку виробничого циклу виготовлення виробів при поточному способі організації виробництва.

36.Пигнастый О. М. К вопросам статистической теории описания производственных систем / О. М. Пигнастый, В. Я. Заруба // Сучасні та перспективні методи і моделі управління в економіці. - Суми: ДВНЗ "УАБС НБУ". - 2008. - С. 25-54.

Здобувачем визначено основні положення статистичної теорії систем управління виробничими поточними лініями. Досліджено балансові рівняння, що визначають поведінку параметрів поточної лінії.

37. Пигнастый О. М. К вопросу использования статистической теории для расчета производственного цикла / В. Д. Ходусов, О. М. Пигнастый // - Вісник Харківського національного університету. - Харків: ХНУ. -2009. - №868, вип.3/43/ Сер. "Фізична". с.112-118.

Здобувачем представлено модель виробничої поточної лінії, заснованої на нормативній траєкторії руху предметів праці, що враховує допустимі відхилення параметрів від незбуреної траєкторії. Отримано умови синхронізації поточної лінії.

38.Пигнастый О. М. Вывод уравнений системной динамики технологического процесса из статистической теории производственно-технических систем / О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов, Т. В. Меркулова // Вісник Харківського національного університету. - Харків: ХНУ. - 2009. - № 869. Сер. "Економічна". - С. 181-189.

Здобувачем удосконалено метод побудови рівнянь системної динаміки для мережі матеріальних потоків, який дозволяє обґрунтувати вибір виду рівнянь через модельні уявлення про властивості виробу і механізми впливу обладнання на нього, що підвищило точність опису та визначило межі застосовності рівнянь.

39.Пигнастый О. М. Анализ устойчивости макропараметров технологического процесса производственно-технической системы / О. М. Пигнастый, В. Я. Заруба, С. Н. Новак // Проблеми і перспективи розвитку банківської системи України. – Суми. ДВНЗ "УАБС НБУ". 2009. - № 27 - С. 199-206.

Здобувачем записано балансові рівняння в малих збуреннях, вирішено дисперсійне рівняння, отримано в загальному вигляді умови стійкості для параметрів поточної лінії, що функціонує в перехідному режимі.

40. Пигнастый О. М. Использование статистической теории для построения энтропийных моделей функционирования технологических процессов / В. Д. Ходусов, О. М. Пигнастый, А. Г. Гах // - Вісник Харківського національного університету. - Харків: ХНУ. - 2011. - №979. Сер. "Фізична" С. 103-108.

Здобувачем розроблено статистичний метод побудови замкнутих ентропійних моделей виробничих поточних ліній, заснованих на кінетичному описі виробничого процесу

41. Pignastiy O. M. Statistical two-level model of the production process. / O. M. Pignasty // Contemporary problems of mathematics, mechanics and computing sciences / Kharkov: Publishing house is a group "Apostrophe". - 2011. - С. 312-322

42. Пигнастый О. М. Задачи программного управления параметрами поточной линии с использованием сверхурочных работ // О. М. Пигнастый, В. Я. Заруба // Информационные технологии в управлении: Сборник трудов 5-ой Российской мультиконференции по проблемам управления (ИТУ-2012), (Санкт-Петербург, 09-11 октября 2012). - Санкт-Петербург: ЦНИИ "Электроприбор". 2012. - С. 107-114.

Здобувачем розроблено дворівневу динамічну модель оптимального управління продуктивністю технологічних ділянок поточної лінії для сталих і перехідних режимів з метою забезпечення квазісинхронізації темпу обробки предметів праці для операцій технологічного маршруту.

43. Пигнастый О. М. Техническое содержание и постановка задачи программного управления параметрами поточной линии с использованием сверхурочных работ. // О. М. Пигнастый, В. Я. Заруба // Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах: Сборник трудов 5-ой Российской мультиконференции по проблемам управления (ИТУ-2012), (Санкт-Петербург, 09-11 октября 2012). - Санкт-Петербург: ЦНИИ "Электроприбор". 2012. - С. 576-579.

Здобувачем поставлено задачу оптимального управління надурочними роботами і розроблено метод її розв'язання.

44. Пигнастый О. М. Энтропийные модели оценки привлекательности инвестиций в производственных моделях эколого-экономических систем: монографія / О. М. Пигнастый / Актуальні проблеми економічної кібернетики. - Київ.: ВД «Стилос». - 2012. - С. 284-290.

45. Пигнастый О. М. Континуальні моделі прогнозування виробничого функціонування поточних ліній / О. М. Пигнастый, В. Я. Заруба // Сучасні концепції прогнозування розвитку складних соціально-економічних систем. - Бердянск: Видавець Ткачук О.В. - 2013. - С. 74-89

Здобувачем розроблено моделі для прогнозування потенціалу поточних ліній.

46. Пигнастый О. М. О новом классе динамических моделей поточных линий производственных систем / О. М. Пигнастый // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Белгород: БГУ. - 2014. - № 31/1. - С. 147-157

47. Pignasty O. M. Statistical Physics methods in economic theory: about the use of characteristic numbers of technological process in production systems classification. / O. M. Pignasty // Quantum electrodynamics and statistical physics (QEDSP2006): book of abstracts of the 2nd International Conference of NASU (QEDSP2006), (Kharkiv, 9-10 September 2006). - Kharkiv: NSC KPTI, 2006. - С. 155.

48. Пигнастый О. М. Функция Лагранжа производственной системы с массовым выпуском продукции/ О. М. Пигнастый // Особенности социально-экономического развития Украины и регионов: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, (Запорожье, 11-12 октября 2007 г.). – Запорожье: ЗИГиМУ, 2007г. – С.189-190.

49. Пигнастый О. М. Управление рисками в экономико-производственных системах с массовым выпуском продукции / О. М. Пигнастый // Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении ИКТМ-2004: труды Международной научно-технической конференции. - Харьков: НАУ "ХАИ", 2004, - С. 424

50. Пигнастый О. М. Синергетическая экономика производственного предприятия с массовым выпуском продукции / О. М. Пигнастый // Statistical Physics 2005: Modern Problems and New Applications: book of abstracts, (Lviv, 28-30 August 2005). - Lviv: Institute for Condensed Matter Physics NASU, 2005, - С. 59.

51. Пигнастый О. М. Стохастическое описание производственных систем / О. М. Пигнастый, В. Г. Михайленко, А. А. Дубровин // Проблеми економічної кібернетики: тези доповідей I-ої Міжнародної науково-практичної конференції з економічної кібернетики.- Харків: ХНУ, 2006. – С.150-151.

Здобувачем розглянуто особливості стохастичного опису виробничих поточних ліній.

52. Pignasty O. M. Thermodynamical analogies in the problems of stability of socio-economic systems functioning and optimal control / O. M. Pignasty // Condensed Matter: Theory and Applications (CMPT 2006): book of abstracts, (Kharkiv, 11-15 September 2006). Kharkiv: Institute for Low Temperature Physics NASU, 2006, - С. 151

53. Пигнастый О. М. О статистической теории производственно-технических систем / О. М. Пигнастый, В. Я. Заруба // Проблеми економічної кібернетики: тези доповідей XII Всеукраїнської конференції.- Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2007 г. – С. 93-94.

Здобувачем розглянуто основні положення статистичної теорії виробничих систем.

54. Pignasty O. M On application of the statistical theory for the description of industrial systems / V.D.Khodusov, O. M. Pignasty // Statistical Physics 2009. Modern Trends and Applications: book of abstracts, (Lviv, 23-25 June 2009). - Lviv: Institute for Condensed Matter Physics NASU, 2009, - С. 93.

Здобувачем розроблено предметно-технологічний та потоковий опис виробничих ліній.

55. Pignasty O. M Application of statistical physics methods for mass product output mathematical models / O. M. Pignasty, V.P.Demutsky., V.D.Khodusov, Application of physics in financial analysis (APFA6): book of abstracts (Lisbon, Portugal, 4-7 July 2007).- Lisbon: Elsevier. – 2007. – P 15

Здобувачем запропоновано використовувати апарат статистичної фізики для побудови балансових рівнянь для параметрів поточної лінії.

56. Pignasty O. M Application of statistical theory for mass product output mathematical models / V.D.Khodusov, O. M. Pignasty // XXIII International conference of statistical physics: book of abstracts (Statphys-23), (Genova, Italia, 9-13 June 2007). - Genova: Elsevier, 2009, - С. 165.

Здобувачем запропоновано використовувати метод малого параметра для розв'язання кінетичного рівняння технологічного процесу. Отримано балансові рівняння для параметрів поточної лінії в нульовому наближенні.

57.Пигнастый О. М. Статистическая теория производственно-технических систем / О. М. Пигнастый // Проблемы економічної кібернетики: тези доповідей XIV Всеукраїнської конференції.- Харків: ХНУ, 2009. - С. 114-117

58.Pignasty O. M The statistical theory of industrial systems / O. M. Pignasty, V.D.Khodusov, V.Mikhailenko, N.Didichenko, A.Dubrovin // Applications of physics in financial analysis. New approaches to the analysis of large-scale business and economic data (APFA7): book of abstracts (Tokyo, Japan, 1 - 5 March 2009). – Tokyo: Tokyo Institute of Technology. - 2009. - P. 8-9.

Здобувачем сформульовані фундаментальні положення, покладені в основу предметно-технологічного та потокового опису ліній виробничих систем.

59.Пигнастый О. М. О взаимосвязи микро- и макроописания производственно-технических систем / О. М. Пигнастый, В.Я.Заруба // Управление большими системами: труды Международной научно-практической конференции (Москва 17-19 ноября 2009). – Москва: ИПУ РАН, 2009. - С. 255-258.

Здобувачем записано кінетичне рівняння технологічного процесу поточної лінії, що забезпечує взаємозв'язок мікро- і макрорівнів опису виробничої системи.

60.Пигнастый О. М. Анализ устойчивости макропараметров технологического процесса производственно-технической системы / О. М. Пигнастый, В. Я. Заруба, С. Н. Новак // Проблемы и перспективы развития банковской системы Украины: сборник тезисов докладов XII Всеукраинской научно-практической конференции (Сумы, 12-13 октября 2009). -Сумы: ДВНЗ «УАБС НБУ», 2009. - С. 108.

Здобувачем запропоновано метод дослідження стійкості параметрів поточної лінії, заснований на першому методі Ляпунова.

61.Пигнастый О. М. Статистическая теория описания производственно-технических систем / О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях (КМНТ-2010): збірник праць міжнародної науково-технічної конференції. - Харків.: ХНУ, 2010, - С. 184-188.

Здобувачем запропоновано метод розв'язання задачі оптимального управління параметрами поточної лінії, заснований на статистичному описі виробничої системи.

62. Пигнастый О. М. К вопросу проектирования технологических процессов / О. М. Пигнастый // Моніторинг, моделювання та менеджмент емерджентної економіки: зб.наук. 2-й Міжнародної науково-практичної конференції, (Черкаси-Одеса, 8-10 вересня 2010). - Черкаси: Брама-Україна. - 2010. - С. 170-172.

63.Пигнастый О. М. Статистическое моделирование технологических процессов / О. М. Пигнастый // Актуальні проблеми розвитку економічної кібернетики: тези доповідей II-й Всеукраїнської конференції, (26 листопада 2010). - Київ: КНУТД. - 2010. – С. 54-55.

64.Пигнастый О. М. Статистическая двухуровневая модель технологического процесса / О. М. Пигнастый // Сучасні проблеми математики і її застосування у природничих науках та інформаційних технологіях: збірник праць Міжнародної наукової конференції, (Харків, 19-22 квітня 2011). - Харків: ХНУ. - 2011. - С. 153-155.

65.Пигнастый О. М. Концептуальные положения статистического моделирования технологических процессов / О. М. Пигнастый // “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я”: тези доповідей XIX Міжнародної науково-практичної конференції (MicroCad 2011), (Харків, 01-03 червня 2011). - Харків: НТУ "ХПІ". - 2011. - ч. 4. - С. 370.

66.Пигнастый О. М. Современные аспекты статистического моделирования технологических процессов / О. М. Пигнастый // Математичне та імітаційне моделювання систем: збірник доповідей другої міжнародної науково-практичної конференції (МОДС 2011), (Чернігів, 27-30 червня 2011). - Чернігів: ЧНТУ. - 2011. - С. 153-157.

67.Пигнастый О. М. Статистическое моделирование и исследование технологических процессов / О. М. Пигнастый // Моделювання та дослідження стійкості динамічних систем: тези доповідей XV-ї Міжнародній конференції (DSMSI 2011), (Київ, 25-27 травня 2011). - Київ: НТУ "КПІ". - 2011. - С. 210.

68.Пигнастый О. М. Энтропия технологического процесса / Заруба В. Я., О. М. Пигнастый // Управление большими системами: труды международной научно-практической конференции "Теория активных систем" (ТАС2011), (Москва, 14-16 ноября 2011). - Москва: ИПУ РАН. - 2011. - Том. 2. - С 145-148.

Здобувачем досліджено поведінку показника хаотичності стану предметів праці виробничо-технічної системи.

69.Пигнастый О. М. Энтропийные закономерности в моделях технологических процессов / О. М. Пигнастый // Обчислювальна та прикладна математика: тези доповідей IV-ї Міжнародній конференції (ОПМ 2011), (Київ, 8-10 сентября 2011). – Київ: КНУ. - 2011. – С 111.

70.Пигнастый О. М. Статистическая теория систем управления технологическим процессом / О. М. Пигнастый // Теорія ймовірностей і математична статистика: тези доповідей Міжнародної конференції ім.М.Кравчука, (Київ, 21-19 квітня 2012). - Київ, 2012. – С. 105-106.

71.Пигнастый О. М. Статистическая модель управления технологическим процессом / О. М. Пигнастый // Системний аналіз та інформаційні технології: Тези доповідей 14-ї Міжнародної науково-практичної конференції, (SAIT2012), (Київ, 24 квітня 2012). - Київ: НТУ "КПІ". - 2012. – С. 105-106.

72.Пигнастый О. М. Теоретические положения статистической теории систем управления технологическим процессом / О. М. Пигнастый // "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я": тези доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції (MicroCad 2012), (Харків, 15-16 травня 2012). - Харків: НТУ "ХПІ". - 2012. - ч. 4. - С. 294-295.

73.Пигнастый О. М. Современные аспекты энтропийного моделирования технологического процесса / О. М. Пигнастый // Математичне та імітаційне моделювання систем: збірник доповідей 7-ої Міжнародної науково-практичної конференції (МОДС 2012), (Чернігів, 25-28 червня 2011). - Чернігів: ЧНТУ. - 2012. – С. 159-163.

74.Пигнастый О. М. Задача программного управления параметрами поточной линии с использованием сверхурочных работ / О. М. Пигнастый, В. Я. Заруба // Информационные технологии в управлении: тезисы докладов международной научно-практической конференции (ИГУ-2012), (Санкт-Петербург, 9-11 октября 2012). - Санкт-Петербург, 2012. – С. 178-181.

Здобувачем представлено результати розв'язання задачі імпульсного управління для параметрів виробничої поточної лінії.

75.Пигнастый О. М. PDE-модели управления производственной поточной линией / О. М. Пигнастый // Системний аналіз та інформаційні технології: тези доповідей 15-ої Міжнародної науково-практичної конференції, (SAIT 2013), (Київ, 27-31 травня 2013). – Київ: НТУ "КПІ". - 2013. – С. 105-106.

76. Pignasty O. M. Statistical theory of management manufacturing process / O. M. Pignasty // “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я”: тези доповідей XXI-ої Міжнародної науково-практичної конференції (MicroCad 2013), (Харків, 29-31 травня 2013). - Харків: НТУ “ХПІ”. - 2013. - ч. 4. - С. 266.

77. Пигнастый О. М. Континуальное моделирование производства на поточных линиях. / О. М. Пигнастый, В. Я. Заруба // Мультиконференция по проблемам управления: тезисы докладов 6-ой Всероссийской научно-практической конференции (МКПУ-2013), (Дивноморье, 30 сентября-5 октября 2013.). - Ростов - на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2013. Том. 4 – С. 166-170.

Здобувачем проведено аналіз основних моделей управління, що використовуються при континуальному описі виробничих поточних ліній.

78. Пигнастый О. М. PDE-модели производственных систем / О. М. Пигнастый // Системний аналіз та інформаційні технології: тези доповідей 16-ї міжнародної науково-практичної конференції (SAIT 2014), (Київ, 26-30 травня 2014).- Київ: НТУ “КПІ”. - 2014. – С. 138-139.

79. Пигнастый О. М. Статистическая теория динамических производственных систем. / Н.А.Азаренков, О. М. Пигнастый, В.Д.Ходусов // “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я”: тези доповідей XXII-ї Міжнародної науково-практичної конференції (MicroCad 2013), (Харків, 29-31 травня 2014). – Харків: НТУ “ХПІ”. - 2014. - ч. 4. - С. 371.

АНОТАЦІЇ

Пігнастий О.М. Статистична теорія систем управління виробничими поточними лініями. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.03 – системи та процеси керування. -Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м.Харків, 2014.

Дисертаційну роботу присвячено розробці та обґрунтуванню концептуальних положень і теоретичних основ статистичної теорії побудови моделей керованих виробничих процесів, використовуваної для проектування високоефективних систем управління поточними лініями, функціонуючими в перехідних і сталих режимах.

Проаналізовано сучасні методи організації виробництва і управління поточними лініями. Сформульовано концепцію статистичного підходу до побудови моделей виробничих поточних ліній, в якій характеристики керованого виробничого процесу визначаються через модельні уявлення про стохастичний механізм впливу обладнання на предмет праці і взаємодію предметів праці між собою. Побудовано предметно-технологічний опис виробничого процесу, заснований на законах збереження, що характеризують процес перенесення технологічних ресурсів на предмет праці, і просторово-часовій структурі технологічного процесу. Розроблено спосіб дворівневого моделювання поточної лінії. Отримано кінетичне рівняння виробничого процесу. Отримано умови стійкості за Ляпуновим для параметрів поточної лінії у двохмоментному описі. Отримано оптимальне управління станом міжопераційних заділів для перехідних режимів функціонування поточної лінії у вигляді функції, що залежить від часу і технологічної позиції поточної лінії. Використовуючи метод функцій Ляпунова, отримано вид оптимальної функції

управління параметрами поточної лінії. Удосконалено метод побудови рівнянь рівнів і темпу для мережі матеріальних потоків, що обґрунтовує вибір виду рівнянь системної динаміки для розглянутого керованого виробничого процесу через модельні уявлення про властивості предмета праці і механізм стохастичного впливу обладнання на предмет. Отримала подальший розвиток динамічна ентропійна модель опису керованого виробничого процесу.

Ключові слова: керований виробничий процес, статистична теорія систем управління виробництвом, методи аналізу і синтезу, стійкість, програмне управління, стабілізація.

Пигнастый О.М. Статистическая теория систем управления производственными поточными линиями. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.13.03 – системы и процессы управления. -Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» Министерства образования и науки Украины, г.Харьков, 2014.

Диссертационная работа посвящена разработке и обоснованию концептуальных положений и теоретических основ статистической теории построения моделей управляемых производственных процессов, используемой для проектирования высокоэффективных систем управления поточными линиями, функционирующими в переходных и установившихся режимах.

Проанализированы современные методы организации производства и управления поточными линиями. Сформулирована концепция статистического подхода к построению моделей производственных линий, в котором характеристики управляемого производственного процесса определяются через модельные представления о стохастическом механизме воздействия оборудования на предмет труда и взаимодействия предметов труда между собой. Построено предметно-технологическое описание производственного процесса, основанное на законах сохранения, характеризующих процесс переноса ресурсов на предмет труда, и пространственно-временную структуру технологического процесса. Исследованы закономерности изменения свойств предмета труда при стохастическом характере воздействия на него оборудования. Разработан способ двухуровневого моделирования поточной линии. Получено кинетическое уравнение и разработаны критерии подобия производственных процессов. Для параметров поточной линии записаны условия устойчивости по Ляпунову. Получено оптимальное управление состоянием межоперационного заделов для переходных режимов функционирования поточной линии в виде функции, зависящей от времени и технологической позиции. Разработаны методы оптимального управления и оптимальной стабилизации параметров поточной линии. Используя метод функций Ляпунова, получен вид оптимальной функции управления из условий устойчивого функционирования поточной линии, что позволило сократить затраты технологических ресурсов на формирование управляющих воздействий, необходимых для ликвидации случайных отклонений параметров, повысить стабильность выпуска продукции. Усовершенствован метод построения уравнений уровней и темпа для сети материальных потоков, который обосновывает выбор вида

технологических ресурсов на формирование управляющих воздействий, необходимых для ликвидации случайных отклонений параметров, повысить стабильность выпуска продукции. Усовершенствован метод построения уравнений уровней и темпа для сети материальных потоков, который обосновывает выбор вида уравнений системной динамики для рассматриваемого управляемого производственного процесса через модельные представления о свойствах предмета труда и механизм стохастического воздействия оборудования на предмет. Получила дальнейшее развитие динамическая энтропийная модель описания управляемого производственного процесса. Обоснован закон возрастания энтропии и показан механизм необратимости протекающих производственных явлений.

Ключевые слова: управляемый производственный процесс, статистическая теория систем управления производством, методы анализа и синтеза, устойчивость, программное управление, стабилизация

Pignasty O.M. Statistical theory of control systems by production lines. - Manuscript.

Thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.13.03 - systems and processes of control. - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkov, 2014.

The analysis of modern methods of production and control of production flow lines are made. The necessity for the application of the statistical approach is justified.

The conceptual basics of statistical theory of control systems by production flow lines are designed. The regularities of changes in the properties of the labor objects is explored. Mechanism of action of process equipment to object of labor and mechanism interaction of objects of labor between themselves is explored. Method of two-level simulation of the production flow line, based on the kinetic equation of the technological process is designed. The two-level simulation method takes into consideration objective technological description of the production flow line at the micro level and streaming description at the macro level. A closed two-level models of PDE-production flow lines are built. Similarity criteria of processes are obtained. The two-level multiple moment models of optimal control and optimal stabilization parameters of the production flow line are designed. Control of the parameters determined from the conditions that ensure the sustainable operation of the production flow line. This reduces the costs of technological resources for building control actions by deviations of parameters and improve the stability of output lines. The method for constructing of system dynamics equations for a network of material flows is improved, and choice of equations is justified. The law of increasing entropy production process is explained. The mechanism of irreversible phenomena occurring process is presented. The developed models for control parameters of production lines are universal. They can be used on domestic and foreign enterprises in the manufacturing process of products in-line method.

Key words: the subject of work, technological process, a two-level model of PDE-optimal control, optimal stabilization, stability criteria, the kinetic equation.

O. Pignasty

Відповідальний за випуск
к.т.н., доц. кафедри комп'ютерного моніторингу і логістики НТУ "ХП"
Святкін Я.В.

Підп. до друку 29.12.2014р. Формат 60x84/16. Надруковано на різнографі
Gestetner 6123CP. Ум.-друк. арк. 2,5. Наклад 120 прим. Зам. № 54-14.
Ціна договірна

Друкарня "Технологічний Центр"
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи ДК №4452 від 10.12.2012
Адреса: 61145, м. Харків, вул. Шатилова дача, 4
