

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ДВНЗ «КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

ЩОКІН Вадим Петрович

УДК 681.5.015

**АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ АГЛОМЕРАЦІЙНИМ КОМПЛЕКСОМ
НА ОСНОВІ АВТОРЕГРЕСІЙНИХ СТРУКТУР З РЕГУЛЯРИЗАЦІЄЮ**

Спеціальність 05.13.07 - автоматизація процесів керування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Кривий Ріг – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в ДВНЗ «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Толмачов Станіслав Трохимович,
ДВНЗ «Криворізький національний університет», завідувач кафедри електромеханіки.

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, професор
Бойко Віталій Іванович,
Дніпродзержинський державний технічний університет, завідувач кафедри електроніки та автоматики;

доктор технічних наук, доцент
Корнієнко Валерій Іванович,
ДВНЗ «Національний гірничий університет», професор кафедри електроніки та обчислювальної техніки.

Захист відбудеться «15» березня 2012 р. о 10³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д09.052.03 в ДВНЗ «Криворізький національний університет» за адресою: вул. Пушкіна, 37, ауд.300, м. Кривий Ріг.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ДВНЗ «Криворізький національний університет» (вул. Пушкіна, 37, м. Кривий Ріг, 50002).

Автореферат розісланий «14» лютого 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д09.052.03,
кандидат технічних наук, доцент М.П. Тиханський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Одними з основних факторів, що різко знижують конкурентоспроможність вітчизняної продукції гірничо-металургійного комплексу на внутрішньому і зовнішньому ринках, є її висока собівартість і знижена якість, яка є меншою в порівнянні з закордонними виробниками агломераційної сировини на 1-3%. В умовах, коли зношення основних засобів виробництва на багатьох гірничо-збагачувальних комбінатах складає 70-80%, фактори збільшення собівартості обумовлені значною питомою енергоємністю (в агломераційному комплексі ПАТ «ПівдГЗК» питома енергоємність складає 21% від загальної собівартості), порушеннями поточних режимів роботи обладнання й умов проведення технологічних процесів. Проблема загострюється, якщо режими роботи агломераційного обладнання близькі до технологічно визначених обмежень, а об'єкти керування є істотно нелінійними, нестаціонарними і характеризуються наявністю інтенсивних неконтрольованих збурень.

Дослідження провідних закордонних та вітчизняних вчених доводять, що одним із ефективних, у тому числі маловитратних, таких, що дають швидкий економічний ефект, шляхів розв'язання вищезазначеної проблеми підвищення продуктивності агломераційного виробництва та металургійної якості агломерату з одночасним зменшенням його собівартості є забезпечення надійного функціонування основного технологічного устаткування за рахунок розробки та впровадження комплексної автоматизації технологічних процесів виробництва агломерату.

Основним завданням функціонування комплексної адаптивної САКТП (з єдиним інформаційно-обчислювальним комплексом) є контроль основних показників технологічного процесу, їх математична обробка й оперативне керування технологічними підсистемами. Розробка та впровадження подібної адаптивної САКТП дозволять підвищити продуктивність, надійність, ритмічність та конкурентоспроможність виробництва вітчизняної продукції гірничо-металургійного комплексу.

Проведений аналіз принципів побудови і результатів функціонування традиційних адаптивних САКТП дозволив зробити висновок про те, що синтез класичних адаптивних структур пов'язаний з такими проблемами: порушення умов узгодження сигналів керування і флуктуації, невизначених на етапі синтезу параметрів об'єкта; при високих ступенях диференційних рівнянь, котрими описують технологічні стадії виробництва, виникають труднощі пов'язані з недоступністю прямих методів визначення всіх координат вектора стану; механізм підтримки заданих показників якості керування при зміні схемно-режимних умов функціонування системи відсутній.

Отже, вдосконалення принципів адаптивного керування агломераційним комплексом на підставі застосування методів та засобів аналізу динамічного стану технологічних процесів реалізованих за рахунок визначення динаміки

зміни непрямих показників процесу спікання та моделей об'єктів керування, які ґрунтуються на базі авторегресійних структур з регуляризациєю, що забезпечує надійне функціонування системи керування в умовах дії значних параметричних та координатних збурень при дотриманні обмежень, встановлених регламентами на проведення технологічних процесів і роботою технологічних агрегатів, є **актуальною науковою проблемою**. Її розв'язання вимагає попереднього вирішення ряду наукових завдань, що забезпечують створення науково-методичної, алгоритмічної і програмно-технічної баз автоматизації виробничих комплексів із застосуванням інформаційних технологій, що і визначає **актуальність** теми дослідження.

У дисертаційній роботі актуальність сформульованої наукової проблеми підтверджується шляхом реалізації принципів адаптивного керування агломераційним виробництвом, що є складним технологічним процесом через відсутність адекватних математичних моделей і наявність ряду неконтрольованих збурень (зміни вологості, гранулометричного, фракційного і хімічного складу вхідної сировини тощо), а також відсутність оперативних методів хіміко-мінералогічного аналізу вхідної шихти і готового агломерату. Агломераційний процес розглядається в роботі як взаємопов'язана технологічна система, яка перебуває під дією випадкових збурень, і в даному випадку, при розробці принципів адаптивного керування, вирішується завдання забезпечення стійкості системи і мінімізації цільової функції.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Вибраний напрямок досліджень започатковано автором дисертації в науково-технічному проєкті, який було внесено до переліку інноваційних пріоритетів держави, плану науково-технічного розвитку України на 1999-2000рр., пункту 129, розділу 2.4 (гірничорудна промисловість) на підставі Постанови Кабінету Міністрів України від 14.12.98 р. № 1971 п.10, затвердженої Міністерством України в справах науки і технологій, Держіннофондом України від 29.12.98р. №13/2-1-4494.

Науковою базою дисертації стали результати, отримані в процесі виконання науково-дослідних робіт, що здійснювалися за планами наукових досліджень Криворізького технічного університету в рамках: **госпдоговірної роботи** №1238 "Аналіз енергетичних режимів роботи основних цехів ВАТ"ПівнГЗК" та **держбюджетних тем**: НДР № ДЗ/30-2004 Розроблення методології синтезу та обґрунтування доцільності впровадження інтелектуальних гібридних систем автоматичного керування технологічними процесами на основі нейромережевих структур та методів нечіткої логіки (номер держреєстрації 0104U004720, відповідальний виконавець - Щокін В.П.); НДР за грантом GP/F11/0002 Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених згідно з договором № Ф11/11-2006 (номер держреєстрації 0106U009498, науковий керівник - Щокін В.П.).

Наукові результати отримані автором дисертаційної роботи, які пов'язані з автоматизацією агломераційного комплексу відзначені на

національному рівні, так у 2006 році автор став лауреатом премії Президента України для молодих вчених відповідно до Указу Президента № 1724/2005.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності керування агломераційним комплексом шляхом застосування методів та засобів аналізу динамічного стану технологічних процесів та адаптивного керування на основі авторегресійних структур з регуляризацією в умовах дії значних параметричних та координатних збурень при дотриманні обмежень, встановлених регламентами на проведення технологічних процесів і роботою технологічних агрегатів.

Завдання досліджень. Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних завдань: дослідження непрямих показників процесу спікання агломерату для розробки методів аналізу динамічного стану технологічного процесу, які ґрунтуються на використанні експертного настроювання параметрів функцій приналежності комплексного показника технологічного процесу довільному нечіткому терму; розробка параметричних методів синтезу адаптивних автоматизованих систем керування технологічними процесами (САК ТП) агломераційного комплексу, які ґрунтуються на використанні авторегресійних моделей з розподіленим лагом $ADL(p, q)$; розробка методів параметричної та структурної оптимізації адаптивних регуляторів систем автоматичного регулювання (САР) нижнього рівня САК ТП спікання агломерату, на базі регуляризації авторегресійних структур; теоретично обґрунтувати принципи побудови тривірневих розподілених адаптивних систем автоматичного керування технологічним обладнанням відділень шихтопідготовки та спікання агломераційного комплексу; розробка методу специфікації інтелектуальних емуляторів технологічних процесів, які забезпечують припустиму похибку апроксимації при розв'язанні задач відтворення прямої та зворотної динаміки об'єктів керування за відсутності їх моделей в аналітичному вигляді; розробка методів та засобів ліквідації інтерференційних шумів в каналах передачі даних для підвищення точності ідентифікації параметрів моделей керованих процесів; розробка адаптивної системи керування агломераційним комплексом на основі авторегресійних структур з регуляризацією.

Об'єктом дослідження є нестационарні технологічні процеси з інтенсивними неконтрольованими збуреннями, для яких порушення технології приводить до істотних економічних втрат, що мають місце при агломерації мінеральної сировини, методи та системи автоматичного керування цими процесами.

Предметом дослідження є моделі й методи ідентифікації параметрів моделей нелінійних нестационарних об'єктів у структурі адаптивної системи керування агломераційним комплексом, алгоритми і методи синтезу адаптивних регуляторів на основі теорій дискретних автоматичних систем, нечітких множин та нейроморфних структур, адаптивні системи керування технологічними процесами агломерації залізних руд на основі авторегресійних структур з регуляризацією.

Методи досліджень. В основу досліджень покладено методи теорії автоматичного керування (для аналізу стійкості систем та синтезу оптимальних законів керування), теорії системного та статистичного аналізу (для встановлення закономірностей і залежностей між визначеними параметрами), теорії нечітких множин (для синтезу систем динамічної ідентифікації нелінійних нестационарних об'єктів керування), теорії штучних нейронних мереж (для синтезу адаптивних нейрорегуляторів, нейроемуляторів та забезпечення ефективного функціонування алгоритмів адаптації), теорії оптимізації (для оптимізації та параметричного синтезу регуляторів і емуляторів у складі адаптивної АСКТП), теорії математичного моделювання (для створення моделей адаптивної АСКТП).

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що:

1) набув подальшого розвитку підхід до синтезу систем визначення динамічного стану нелінійних нестационарних процесів в умовах відсутності математичних моделей об'єктів в аналітичному вигляді, за рахунок використання методу формалізації технологічних ситуацій та ідентифікації параметрів моделей об'єктів керування агломераційного комплексу, в якому на відміну від існуючого, використаний принцип експертного настроювання параметрів функцій приналежності комплексного показника технологічного процесу довільному нечіткому терму, що дозволило підвищити точність оцінки величини шару спеченого агломерату на аглострічці, як координати процесу в середньому на 12%, та визначити стадію завершення процесу спікання з максимальною похибкою 2,5%;

2) отримала подальший розвиток методологія моделювання об'єктів керування, заснована на авторегресійних структурах з регуляризациєю, зокрема вперше розроблено адаптивний емулятор зі структурою $ADL(p,q)$, який характеризується асимптотичною стійкістю та адаптивними властивостями, отриманими за рахунок настроювання вагових коефіцієнтів регресійного лага на базі модифікованого градієнтного методу мінімізації квадратичного функціоналу, а умова стійкості забезпечується настроюванням вагових коефіцієнтів критеріального лага, що істотно спростило адаптивний процес настроювання параметрів локальних регуляторів з гарантованою стійкістю системи і стало основою для розробки адаптивних алгоритмів керування технологічними процесами агломераційного комплексу;

3) вперше розроблено метод специфікації нейроморфних емуляторів прямої та зворотної динаміки об'єктів керування заснованих на авторегресійних структурах за відсутності їх моделей в аналітичному вигляді, який ґрунтується на визначенні порядку кінцевих різниць перехідної функції об'єктів, що дозволяє реалізувати адекватне визначення структурно-параметричних особливостей регуляторів локальних систем автоматичного регулювання параметрів процесів агломераційного комплексу;

4) набув подальшого розвитку підхід до визначення корекції уставок регуляторів локальних систем автоматичного регулювання параметрів процесів агловиробництва, в якому уставки визначаються нейронечіткими

системами визначення активних систем автоматичного регулювання з урахуванням комплексної координати процесу, що дозволило врахувати стан технологічних підсистем та динаміку зміни непрямих параметрів процесу спікання агломерату в процесі керування;

5) вперше розроблено метод адаптивного керування технологічним процесом спікання агломерату з параметричною адаптацією локальних регуляторів, в якому, на відміну від існуючих, зменшуються амплітуди коливань вихідних параметрів процесу у середньому на 0,8% за рахунок компенсації неконтрольованих збурень шляхом регуляризації авторегресійних структур забезпечується узгоджена робота технологічних агрегатів відділення спікання за рахунок застосування розроблених адаптивних систем керування з регуляторами зі структурою $ADL(p,q)$ які пов'язані з системами корекції їх уставок, що дозволило підвищити середньодобову продуктивність агломераційного комплексу на 0,91% за умови підтримки заданої якості агломерату.

Практичне значення одержаних результатів визначається тим, що на основі теоретичних досліджень реалізовано адаптивні автоматизовані системи керування нестационарними технологічними процесами агломераційного виробництва, які дозволяють при забезпеченні заданої якості готового продукту підвищити продуктивність основного технологічного обладнання агломераційного комплексу і зменшити його енергоспоживання.

Розроблені в дисертації методи, засоби та підходи до синтезу та аналізу адаптивних систем автоматичного керування технологічними процесами впроваджені та пройшли промислові випробування на об'єктах: ВАТ «Марганецький гірничо-збагачувальний комбінат» - розгалужені конвеєрні лінії шахт і рудників; ВАТ «Криворізький залізорудний комбінат» - ТП розвантаження шахтних вагонеток, розгалужені конвеєрні лінії шахт і рудників, ТП видобутку та транспортування (впровадження АСКТП забезпечує зменшення обсягів невиробничих витрат на 10-13% від загального обсягу); ВАТ «Південний гірничозбагачувальний комбінат» - ТП спікання агломерату в умовах АФ№1 з річним обсягом продуктивності за агломератом 2,4 млн. т. (впровадження адаптивної САКТП забезпечує отримання річного економічного ефекту 796381,6 грн.); ВАТ «Північний гірничозбагачувальний комбінат» - впровадження систем визначення уставок локальних систем нижнього рівня керування ТП та нейронечіткого планування графіків проведення планово-попереджувальних ремонтів дозволяє знизити питому витрату електроенергії на 0,5-1%; ВАТ «АреслорМіттал Кривий Ріг» - агломераційний комплекс ГЗК (впровадження розробленої адаптивної АСКТП спікання агломерату дозволяє забезпечити задані якісні показники готового продукту та підвищити середньодобову продуктивність агломераційного комплексу на 0,91%) що є практичним свідченням їх практичної реалізації в умовах керування об'єктами з немодельованою динамікою.

Матеріали дисертації використані в навчальному процесі при створенні нового навчального курсу «Інтелектуальні автоматизовані системи керування технологічними процесами», і в уже наявних курсах «Моделювання електромеханічних систем», «Спеціальні методи розрахунків електромеханічних пристроїв на ЕОМ», «Спеціальні методи дослідження електромеханічних систем» та при дипломному проектуванні студентів спеціальностей 7.05070207 та 7.05070103.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій забезпечується коректністю математичної постановки завдання; обґрунтованим використанням окремих положень методів аналітичного й імітаційного моделювання, теорій автоматичного керування, системного та статистичного аналізу, нечітких множин та штучних нейронних мереж; задовільною збіжністю результатів теоретичних досліджень, комп'ютерного моделювання, та промислових випробувань; використанням достатнього за обсягом статистичного матеріалу що забезпечує похибку до 5 %.

Особистий внесок здобувача. Здобувач є єдиним автором усіх наукових ідей, які відповідають теоретичним розробкам і науковим положенням, що виносяться на захист. Дослідження з окремих застосувань адаптивних систем керування побудованих на базі авторегресійних структур з регуляризацією, розробка технічних і програмних засобів для їх реалізації, виробничі випробування і впровадження виконувалися разом з його аспірантами. Вони також були основними співвиконавцями НДР, безпосередньо пов'язаними з темою дисертації, де здобувач був науковим керівником, і співавторами відповідних публікацій. У публікаціях із співавторами здобувачеві належать вибір наукового напрямку, обґрунтування планів і методів досліджень, розробка математичних моделей і алгоритмів керування, висновки за результатами досліджень.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи та результати досліджень доповідалися, обговорювалися та отримали схвальний відгук на: МНТК «Інноваційні технології в економіці, керуванні та освіті», м. Смоленськ, 2008; Міжнародному форумі-конкурсі молодих вчених «Проблеми надрокористування», м. Санкт-Петербург, 2008, 2011; 4-й Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційна техніка та електромеханіка» (ІТЕЭМ-2007), Східноєвропейський НТУ ім. В.Даля, 2007; МНТК «Гірнична енергомеханіка и автоматика», м. Донецьк, 2007; МНТК «Енергетика: економіка, технології, екологія», НТУУ «КПІ», м. Київ, 2010; НТК «Енергоефективні технології, обладнання та системи в гірничорудній промисловості», НДПІ «Механообрчормет», м.Кривий Ріг, 2009; XII МНТК «Проблеми енергозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика», м. Кременчук, 2009, 2010; XII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології в освіті та управлінні», м. Нова Каховка, 2009, 2010; МНТК «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія и практика», АР Крим, 2008, 2009, 2010; міжнародних науково-

технічних конференціях Криворізького технічного університету у 2006–2010 рр.

Завершена дисертаційна робота пройшла апробацію на наукових семінарах: ДП «Криворізький інститут автоматики» (14.04.2011р.), Національного технічного університету України «КПІ» (17.05.2011р.), регіональній нараді з питань енергозбереження й енергоефективності, Рівненська ОДА (06.08.2010р.), Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (01.06.2011р.), Дніпродзержинського державного технічного університету (18.04.2011р.).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображено у 51 друкованій праці, з них 1 монографія, 46 статей (у тому числі 26 одноосібних) у спеціальних наукових виданнях, що входять до переліку ВАК України. Новизна дисертаційної роботи підтверджена двома патентами.

Структура й обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та додатків. Загальний обсяг роботи становить 443 сторінок, із них основна частина на 306 сторінках, список використаних джерел з 287 найменувань на 32 сторінках, 10 додатків обсягом 81 сторінка. Робота містить 181 рисунок і 13 таблиць (24 повні сторінки відведені під рисунки і таблиці).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи та її зв'язок з науковими програмами та темами, сформульовано мету та завдання наукового дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено дані про рівень апробації та кількість публікацій за тематикою виконаних досліджень.

У **першому розділі** наведений аналіз стану автоматичного керування технологічними процесами шихтопідготовки і спікання агломераційного комплексу.

Проведений аналіз агломераційної технології дозволив зробити висновок, що дане виробництво є типовим нелінійним багаторівневим процесом гірничо-металургійної галузі, для якого реалізація комплексної програми автоматизації пов'язана з вирішенням завдань синтезу адаптивних систем багаторівневого керування, які дозволять покращити ефективність виробництва і зменшити його енергоспоживання.

Аналітичний огляд робіт Андрієвського С.К., Астахова А.Г., Базилевича С.В., Богаєнко І.М., Грищенко А.З., Єфименко Г.Г., Рудя Ю.С., Рюмшина М.О., Тимофєєва Б.Б., Федоровського М.В. та інш., пов'язаних з проблемами автоматичного керування агломераційним процесом, показав, що у розробках і промислових реалізаціях САКТП агломераційним комплексом в Україні і СНД досягнуто певні позитивні результати, проте такі завдання вирішувалися не комплексно і, в основному, являють собою розрізнені системи. Проблеми оперативного керування

взаємозв'язаними виробництвами, а також автоматизація взаємодії різних рівнів системи практично не досліджувалися й не отримали відповідної промислової реалізації.

Аналіз технологічних особливостей процесів виробництва агломерату дозволив визначити, що система комплексної автоматизації технологічного процесу агломерації повинна вирішувати завдання дозування компонентів шихтових матеріалів, контролю і регулювання вологості шихти та процесу спікання агломерату. При цьому інформація про хід технологічного процесу повинна бути доступна всім локальним підсистемам, а отже, необхідним є створення єдиного інформаційного поля, пов'язаного з інформаційно-вимірювальними комплексами окремих технологічних ліній.

Однією з причин, які ускладнюють розробку традиційних систем автоматичного керування, є неоднорідність сировини, яка поступає на агломераційну стрічку та відсутність математичного опису процесів агломераційного виробництва через специфічні особливості технологічного процесу до яких можна віднести: нелінійність об'єкту керування; безперервність та поточність; значний час транспортного запізнювання вихідних параметрів; наявність інтерференційних шумів в каналах передачі даних тощо.

Великого значення в розв'язанні проблеми забезпечення відповідних статичних та динамічних характеристик об'єктів керування з немодельованою динамікою за рахунок проектування САК на базі інтелектуальних технологій мають роботи авторів: Бідюка П.І., Бойко В.І., Галушкіна О.І., Корнієнко В.І., Круглова В.В., Лозинського А.О., Моркуна В.С., Омату С., Осовського С., Ротштейна А.П., Терехова В.О., Тюкіна І. Ю., Ускова А.О., Хорольського В.П. Проведений аналіз дозволив зробити аргументовані висновки, що проблема підвищення ефективності керування агломераційним комплексом за відсутності відповідних математичних моделей об'єктів керування, методів та засобів оперативного визначення динамічного стану технологічного процесу спікання, може бути вирішена при застосуванні сучасних інтелектуальних технологій.

Виходячи з проведеного огляду доступних джерел визначені перспективні напрями та актуальні науково-технічні завдання в області синтезу та аналізу адаптивних САКТП агломераційного комплексу, а саме: розробка інтелектуальних систем керування, структура подання знань в яких базується на основі ситуаційно-фреймових мереж; розробка гібридних інтелектуальних систем керування, котрі використовують динамічну базу знань для перетворення концептуальних понять; розробка адаптивних систем автоматичного керування складними технологічними процесами на основі нечіткої логіки, нейромережових структур і авторегресійних структур з регуляризцією; розробка методів аналітичного дослідження інтелектуальних систем керування; розробка ефективних алгоритмів чисельного моделювання і дослідження систем керування, які базуються на технологіях нечіткого висновку.

Другий розділ присвячено розробці теоретичних аспектів синтезу систем визначення динамічного стану нелінійних, нестационарних процесів у адаптивних системах керування агломераційним комплексом.

Значній кількості технологічних процесів гірничо-металургійної галузі, таких як процеси спікання агломерату, випалювання котунів, збагачення та інш., властива проблема неможливості безпосереднього контролю параметрів режиму, за якими може здійснюватись ефективне автоматичне керування процесом. Контроль проводиться або візуально обслуговуючим персоналом, у більшості випадків візуальний контроль завершеності технологічних процесів застосовується в процесах спікання агломерату та випалювання котунів, або при застосуванні систем автоматичного контролю непрямих показників, значні похибки яких пов'язані з варіацією ряду неконтрольованих зовнішніх впливів.

Отже, розробка методів і засобів визначення динамічного стану складних технологічних процесів агломераційного комплексу, які забезпечують підвищення точності оцінки координат процесу з метою ефективного керування нестационарними об'єктами є актуальною науковою задачею. Його вирішення вимагає попереднього розв'язання ряду науково-технічних завдань, пов'язаних з розробкою методу комплексного оцінювання непрямих показників процесів та його програмно-апаратної реалізації із застосуванням сучасних інформаційних технологій.

Метод комплексного оцінювання непрямих показників процесів керування ґрунтується на розробленому алгоритмі (рис.1) прийняття колективного рішення щодо параметрів функції приналежності (ФП) змінної (x) довільному нечіткому терму (T), який має вигляд:

1. В інформаційну систему (IC) надходять часткові рішення $\delta_1, \dots, \delta_N$ від окремих систем автоматичного контролю непрямих показників процесу або алгоритмів динамічної класифікації предметної області $A_1, \dots, A_N$.
2. Проводиться попередній розрахунок частоти появи k -го класу, в якому перебуває об'єкт ідентифікації.
3. Розраховуються ймовірності помилки алгоритмів оцінювання динамічного стану об'єкту ідентифікації.
4. Відповідно до колективного вирішального правила системою генерується колективне рішення про стан, в якому знаходиться предметна область $y[1], \dots, y[G]$, де $y[n] \in \{1, \dots, M\}$:

$$D(S) = \arg \max_{1 \leq m \leq M} P(V_m) \prod_{j \in lm} [1 - P(A_j / V_m)] \prod_{j \in lm} P(A_j / V_m). \quad (1)$$

Сформоване значення колективного рішення приймається в якості координати максимуму (b) функції приналежності змінної (X) довільному нечіткому терму (T) - $\mu^T(b) = 1$. Аналітична модель функції приналежності має стандартний гаусовий вид.

5. Коефіцієнт концентрації (c) функції приналежності розраховується відповідно до умов (2), в яких використовуються I_{per}^* – відсоткові значення ІС, рішення яких співпало з колективним; $I_{M_per}^-$, I_M^- – відсоткове значення та множини ІС, рішення яких не співпало з колективним рішенням, розрахованим згідно з колективним вирішальним правилом (1):

$$\left. \begin{aligned} c &= \bar{X} - 0.99 \cdot \bar{X}, \text{ if } I_M^- = 0, \\ c &= \bar{X} - \frac{I_{per}^*}{100} \bar{X}, \text{ if } I_{per}^* > 0, I_{M_per}^- > 0, \\ c &= \bar{X}, \text{ if } I_{i_per}^- = I_{j_per}^-, \forall i, j = 1, \dots, M, \\ c &= 10 \cdot \bar{X}, \text{ if } I_{per}^* = I_{i_per}^- = I_{j_per}^-, \forall i, j = 1, \dots, M \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

6. Коректуються записи бази даних, в якій зберігаються поточні значення ймовірнісних характеристик $P(A_i / V_k)$, $P(V_k)$ ($i=1, \dots, N, k=1, \dots, M$).

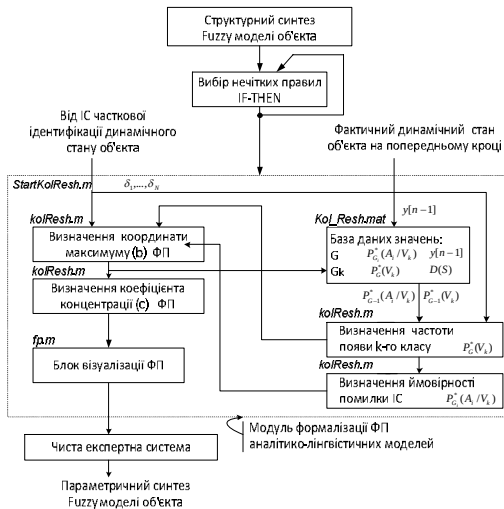


Рис.1. Структура алгоритму формалізації функцій приналежності змінної (x) нечіткому терму (T)

Розроблена статистична методика формалізації ФП змінної довільному нечіткому терму має такі відмінні властивості:

- формалізація ФП проводиться на етапі структурного синтезу нечіткої моделі об'єкта з використанням комплексу самостійних систем автоматичного контролю непрямих показників процесу;

- розроблений метод дає змогу підвищити точність формування ФП при використанні її стандартної аналітичної форми запису;

- розроблений алгоритм формалізації ФП вільний

від похибки зведення графічного подання ФП до аналітичної форми запису;

- запропонований метод формування ФП орієнтований на механізм *on-line* набуття знань.

Розроблений метод комплексного оцінювання непрямих показників процесів керування може бути ефективно використаний як математична основа прогнозуючих моделей у системах визначення динамічного стану

нелінійних, нестаціонарних процесів. Ефективність запропонованого методу підтверджується в результаті розв'язання задачі оперативного визначення вертикальної швидкості спікання агломерату, як координати процесу стадії завершення технологічного процесу спікання агломерату.

Як математичний апарат системи визначення динамічного стану процесу спікання агломерату застосовано розроблений метод статистичної формалізації функцій приналежності нечітких емуляторів і контролерів. В якості первинних інформаційних систем непрямого контролю вертикальної швидкості спікання агломерату використано типові технічні засоби зв'язку та контролю непрямих показників технологічного процесу: 1) САК температури повітря у вакуум-камерах з первинними датчиками ТХК-2088, БУ-11; 2) САК розрідження у вакуум-камерах з первинним приладом «Сапфір»; 3) САК електромагнітного випромінювання шару спеченої шихти з підсистемою контролю Lake Shore 460; 4) САК освітленості у вакуум-камерах з приладом УКС. Структурну схему автоматичного контролю динамічного стану процесу спікання агломерату наведено на рис.2.

У системі використано: виконавчі механізми (ВМ); блоки контролю розрідження у вакуум-камерах 8, 11-13 (ДР); блоки контролю температури у вакуум-камерах 10, 11-13 (ДТ); блоки контролю випромінювання шару

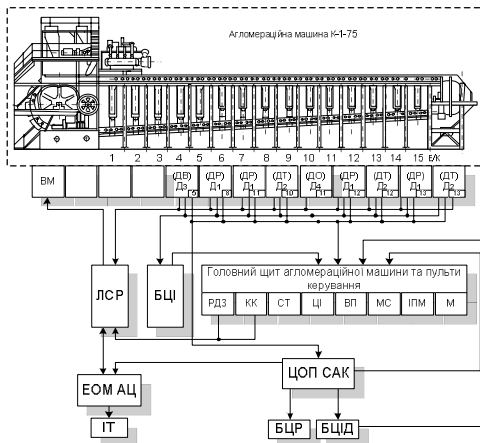


Рис.2. Фрагмент структурної схеми системи визначення динамічного стану процесу спікання агломерату в замкнутому контурі

шихти над 5 вакуум-камерою (ДВ); блок контролю освітленості у 11 вакуум-камері (ДО); локальні системи регулювання (ЛСР); блок цифрової індикації з частотними входами (БЦІ); ручні дистанційні задатчики (РДЗ); ключі керування (КК); сигнальне табло (СТ); цифрові індикатори (ЦІ); вторинні прилади (ВП); мнемосхеми (МС); індикатори положення механізмів (ІПМ); монітор (М); промисловий комп'ютер аглоцеху (ЕОМ АЦ); цифровий обчислювальний пристрій системи автоматичного контролю (ЦОП САК) (виконує

архівацию та обробку первинної інформації, розрахунок комплексних та питомих показників роботи агломашини з автоматичним формуванням звітів); інформаційне табло (ІТ); блок цифрової реєстрації (БЦР); блок цифрової індикації з дискретними входами (БЦД).

У результаті дослідження основних характеристик розробленої системи визначення динамічного стану процесу спікання агломерату встановлено, що використання в системі стандартної аналітичної форми запису функцій приналежності і розробленого методу комплексного оцінювання непрямих показників процесів дозволяє забезпечити надійне функціонування системи в усіх режимах роботи за наявності значних параметричних та координатних збурень, що забезпечує підвищення точності оцінки величини шару спеченого агломерату на аглострічці, як координати процесу в середньому на 12 %, та надійне визначення стадії завершення процесу спікання з максимальною похибкою 2,5 % над початковими вакуум-камерами (5–8 в/к).

Третій розділ присвячено розробці та аналізу нейронечітких емуляторів середнього рівня адаптивних САКТП агломераційного комплексу, що сприяло подальшому розвитку підходупов'язаному з визначенням корекції уставок регуляторів локальних САР параметрів процесів агловиробництва.

Відповідно до запропонованої форми повної похідної за часом від функції Ляпунова

$$\dot{V} = -\Psi^2 + \left[\frac{y(t+1)}{y^3(t+1) - y(t+1)} \underline{\sigma} \underline{\theta} + g(x) \frac{\partial \Psi}{\partial x_n} \Psi \theta \zeta(x) \right], \quad (3)$$

розроблено метод аналітичного конструювання закону адаптації параметрів функцій приналежності нечіткого контролера $\underline{\sigma} = f(c, a, b)$ (в якості методу фазифікації прийнята узагальнена гаусова функція), який забезпечує асимптотичну стійкість системи при виконанні умови ($\dot{V} < 0$)

$$\sigma = \frac{\partial((y^3(t+1) - y(t+1)))}{\partial \sigma} ((y^3(t+1) - y(t+1))) e_{\zeta}(\underline{e}), \quad (4)$$

де Ψ – поточний ступінь затухання перехідного процесу регулювання; $x = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T \in \mathbb{R}^n$ – вектор стану об'єкта керування; $g(x)$ – нелінійна функція; y – вихідна змінна; $\underline{\theta} = \sigma - \sigma^* = \Delta \sigma$ – різниця фактичного й еталонного значень параметра fuzzy-системи, що підлягає налаштуванню; $y^3(t+1)$ – еталонне значення вихідного сигналу; $y(t+1)$ – фактичне значення вихідного сигналу; $\zeta(x)$ – функція вхідних параметрів.

Основний нечіткий контролер включається в зовнішній контур локальної САР і забезпечує оптимальну траєкторію системи керування за рахунок компенсації оператора об'єкта керування. З метою апроксимації визначеного закону керування в контролері враховується динаміка поточних значень похибки локальних САР. З цією метою до структури включено емулятор, який виконує функціональну ідентифікацію параметрів моделі динамічного стану об'єкта в *on-line* режимі.

Результати дослідження розробленої системи дозволили визначити переваги запропонованого адаптивного контуру в структурі адаптивної САКТП: динаміка поточних значень похибки сигналу керування

враховується в нейронечіткому контролері в режимі реального часу завдяки аналізу сигналу емулятора; сигнал керування забезпечує виконання умови стійкості замкнутої системи; обмеження на структуру і кількість продукційних правил емулятора не впливають на ефективність роботи системи при варіації оператора об'єкта в широких межах.

Визначені на етапі імітаційного моделювання недоліки застосування нечітких структур оберненого відображення вимагають розробки ефективних алгоритмів оперативного навчання нечіткого нейроемюлятора, які дозволять вирішити такі завдання: удосконалення алгоритму адаптації нечіткої мережі Ванго-Менделя з метою зниження авторегресійної похибки; підтримка заданих показників якості при змінах оператора об'єкта в процесі експлуатації в широких межах; алгоритмічне забезпечення гарантованої стійкості системи за умови мінімізації функції мети та квадратичного супровідного функціонала якості керування.

З метою розв'язання поставлених завдань запропоновано метод аналітичного синтезу алгоритму адаптації нейронечіткого емулятора, розробленого на базі структури Ванга-Менделя, в основу якого покладено алгоритм настроювання синаптичних коефіцієнтів (найшвидчий спуск) для третього прихованого шару нейронечіткої мережі згідно з оцінюванням похибки відтворення вхідної функції САР

$$w_{lk}(t+1) = w_{lk}(t) - \eta \delta_k \cdot \prod_{j=1}^N \left[1 / \left(1 + \left(\frac{x_i - c_j^{(k)}}{\sigma_j^{(k)}} \right)^{2b_j^{(k)}} \right) \right], \quad (5)$$

де

$$\delta_k = e(t+1) \frac{\partial y(t+1)}{\partial y(x)} y(x) (1 - y(x)). \quad (6)$$

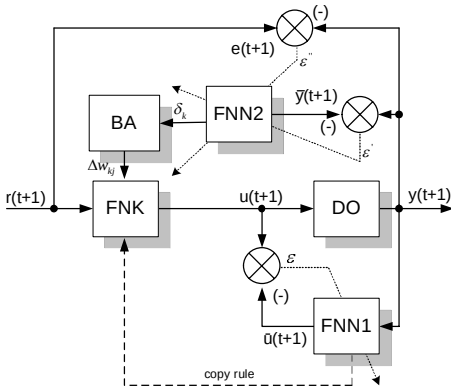


Рис.3. Базова структура адаптивної САР з нейронечітким емулятором і контролером

У розробленому законі адаптації (5) використовується Якобів системи (6), для структурного оцінювання якого застосовано ідентифікатор оператора об'єкта FNN2 (рис.3). На рис.3 прийнято такі умовні позначення: DO – об'єкт керування; FNK – нечіткий контролер; FNN1 – нечіткий нейроемюлятор зі структурою Ванга-Менделя; BA – блок адаптації.

Аналіз результатів функціонування алгоритму і структури адаптивної САР

дозволяє зробити такі висновки: запропонований метод побудови адаптивних САР дозволяє вирішувати завдання керування, коли керуючий вплив входить нелінійно в опис об'єкта в просторі станів; запропонований метод синтезу дозволяє синтезувати регулятори для об'єктів з невідомим математичним описом; структура й алгоритм функціонування розробленої системи орієнтовані на відпрацювання еталонного завдання в умовах наявності зовнішніх і внутрішніх збурень, які не підлягають оперативному контролю; формування базових законів керування технологічними процесами може проводитися з урахуванням знань і навичок оперативного персоналу; алгоритм функціонування системи забезпечує гарантовану стійкість системи керування за рахунок виконання умови стійкості, визначеної відповідно до функції Ляпунова.

Значний час адаптації нечітких систем (2-3 періоду) дозволяє зробити висновок, що сферою ефективного застосування подібних систем у структурах локальних САР є зовнішній контур, призначення якого пов'язано з визначенням корекції уставок регуляторів локальних САР параметрів процесів агловиробництва, що дозволяє врахувати стан технологічних підсистем та динаміку зміни непрямих параметрів процесу спікання агломерату в процесі керування.

З метою вирішення завдань аналітичного дослідження систем керування з блоками нечіткого висновку запропоновано методику еквівалентування нелінійних імпульсних та нечітких систем керування, яка ґрунтується на базі розрахунку максимального кутового коефіцієнта ліній регресії інтерполяційних вузлів з нульовою вільною складовою прямої регресії.

У четвертому розділі отримала подальший розвиток методологія моделювання об'єктів керування, заснована на авторегресійних структурах з регуляризацією, що дозволило розробити адаптивні авторегресійні системи (ARMA-системи) нижнього рівня САК ТП, в яких поєднано одночасне розв'язування завдань забезпечення асимптотичної стійкості і мінімізації функціоналу якості в умовах немодельованої динаміки об'єктів керування.

В основу запропонованого методу синтезу адаптивних ARMA-систем керування покладено застосування структури різницевих моделей ADL(p,q) (autoregressive distributed lag)

$$y(t) = \alpha + \sum_{k=1}^p \beta_k y(t-k) + \sum_{l=0}^q \gamma_l \zeta(t-l) + \varepsilon, \quad (7)$$

де $\zeta(\cdot)$ – незалежна змінна (регресор); β_k ($k = 0, 1, \dots, p$) та γ_i ($i = 0, 1, \dots, q$) – вагові коефіцієнти вхідних та вихідних змінних.

Структура різницевого рівняння (7) характеризує авторегресійні процеси (AR(p)-модель з розподіленим лагом критеріальної змінної) з ковзним середнім (MA(q)-модель з розподіленим лагом регресора) або ARMA-процеси.

Адаптивні властивості ARMA-моделей(7) отримано за рахунок застосування розробленого методу нейроморфного настроювання вагових коефіцієнтів $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2 \dots \gamma_n$ у дискретній адаптивній структурі ARMABiS (*AutoRegressive with Moving Average Brain-inspired Systems*)

$$y[i] = \mu \sum_{j=0}^q \gamma_j x[i-j] + (1-\mu) \cdot \left(\sum_{j=1}^{p-1} (-1)^{j+1} \cdot p \cdot y[i-j] \right) + (-1)^{p+1} \cdot y[i-p] + \mu \varepsilon[i], \quad (8)$$

яка синтезована на базі визначення еталонного значення $y^*(t)$ вихідної координати об'єкта керування $y(t)$ у дискретній МА(q)-моделі з розподіленим лагом порядку (0,q)

$$y^*[i] = \alpha + \sum_{j=0}^q \gamma_j x[i-j] + \varepsilon[i], \quad (9)$$

і його виключення з кінцевих різниць

$$\Delta^m y[i] = \mu(1-B)^m = \mu(\Delta^{m-1} y^*[i] - \Delta^{m-1} y[i-1]), \quad i = 0 \dots n-m, \quad (10)$$

де B – лаговий оператор; μ - коефіцієнт регуляризації ARMABiS-структури.

Нейроморфна адаптація вагових коефіцієнтів $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2 \dots \gamma_n$ проводиться на базі модифікованого градієнтного методу мінімізації квадратичного функціонала

$$J(\varepsilon_u) = 0, 5 \varepsilon_u^T \varepsilon_u. \quad (11)$$

Адаптація вагових коефіцієнтів моделі (8) на кроці [i+1] проводиться згідно з шаблоном:

$$\gamma_j[i+1] = \gamma_j[i] - h q^{(i-j)}[i] \Lambda^{(j)}[i], \quad (12)$$

де $q^{(i-j)}$ – розподілений лаг регресора, h - швидкість настроювання,

$$\Lambda^{(j)}[i] = \text{col} \left(\frac{\partial J}{\partial q_1^{(i-j)}}, \dots, \frac{\partial J}{\partial q_n^{(i-j)}} \right) = -\varepsilon_u[i]. \quad (13)$$

Асимптотична стійкість системи керування з ARMABiS-структурами забезпечується при виконанні умови загасання вільного руху

$$|\lambda_v| < 1 \quad (v = 1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

системи, яка описується характеристичним рівнянням

$$y[i] - (1-\mu) \left(\sum_{j=1}^{p-1} (-1)^{j+1} \cdot p \cdot y[i-j] \right) - (1-\mu) \cdot (-1)^{p+1} \cdot y[i-p] = 0, \quad (15)$$

Отриманим шляхом перетворення загальної форми рівняння в кінцевих різницях (7) з урахуванням біноміальних коефіцієнтів $C_k^v = \frac{k!}{v!(k-v)!}$

$$c_0 y[i] = b_0 \zeta[i+q-p] + b_1 \zeta[i+q-1-p] + \dots + b_m \zeta[i-p] - c_1 y[i-1] - \dots - c_n y[i-p] + v \varepsilon[i]. \quad (16)$$

Шаблон (16) дозволяє розробити ARMABiS-модель $ADL(p,q)$, яка закладена в основу визначення характеристичного рівняння (15):

$$\begin{aligned} y[i] - (1 - \mu) \left(\sum_{j=1}^{p-1} (-1)^{j+1} \cdot p \cdot y[i-j] \right) - (1 - \mu) \cdot (-1)^{p+1} \cdot y[i-p] = \\ = \mu \sum_{j=0}^q \gamma_j x[i-j] + \mu \varepsilon[i]. \end{aligned} \quad (17)$$

Загальне рішення неоднорідного різницевого рівняння (17) запропоновано подати у вигляді суми перехідної та вимушеної складових. Перехідна складова визначається за загальною формулою

$$y(i) = C_1 \lambda_1^i + C_2 \lambda_2^i + \dots + C_n \lambda_n^i, \quad (18)$$

де $\lambda_v (v=1, 2, \dots, n)$ - некрatні корені характеристичного рівняння (15), C_v - довільні постійні.

Отже, розроблено метод синтезу ARMABIS-емуляторів зі структурою $ADL(p,q)$ (7), які характеризуються асимптотичною стійкістю та адаптивними властивостями, отриманими за рахунок настроювання (12) вагових коефіцієнтів регресійного лага (MA(p)-складова) на базі модифікованого градієнтного методу мінімізації квадратичного функціонала (11), а умова стійкості (14) забезпечується настроюванням вагових коефіцієнтів критеріального лага (AR(q)-складова).

Специфікація ARMA-процесу (визначення лагової структури ARMABiS-моделей) (17) проводиться відповідно до розробленого методу оцінювання величини найбільшого лага, який ґрунтується на дослідженні кінцевих різниць перехідної функції об'єкта керування згідно з наступним *твердженням*: якщо будь-яка k -а різниця від перехідної функції $h[i]$ динамічного об'єкта, що визначена в дискретному просторі $\mathfrak{R}$, виявиться приблизно постійною, в межах необхідної точності ε , то перехідна функція об'єкта керування для свого відтворення нейроморфними емуляторами з похибкою δ потребує k -ої глибини ретроспективного вектора стану (k -го порядку ARMABiS-моделей).

Доведення: у разі постійного значення дискрету розглядається процедура визначення послідовних різниць перехідної функції $y = \varphi(x)$.

Для спрощення доказу твердження перейдемо у двовимірний простір, що дозволяє розглядати ARMABiS-модель $ADL(p,q)$

$$h(i) = a \cdot y(i-1) + b \cdot u(i) \quad (19)$$

якеквівалент інтерполяції функції $y = \varphi(x)$ поліномом другого ступеня.

У даному випадку друга кінцева різниця зводиться до постійного значення:

$$\Delta^2 \varphi(x) = [2ah \cdot (x+h) + (ah^3 + bh)] - [2ah \cdot x + (ah^2 + bh)] = 2ah^2. \quad (20)$$

Останнє дозволяє стверджувати, що ступінь кінцевих різниць, для яких виконується умова

$$\Delta^k \varphi(x) = \text{const}(\pm \varepsilon), \quad (21)$$

відповідає глибині ретроспективного вектора стану нейромережевого, Fuzzy або ARMABiS-емуляторів, які рівномірно апроксимують перехідну функцію об'єкта керування з точністю ε на інтервалі дослідження.

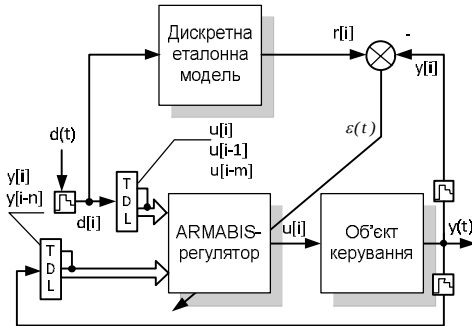


Рис.4. Структурна схема системи адаптивного керування з еталонною моделлю

Метод синтезу ARMABiS-емуляторів зі структурою ADL(p,q) дозволив розробити концепцію параметричного синтезу асимптотично стійких адаптивних систем керування об'єктами, що перебувають під дією випадкових збурень, в основу якої покладено принципи синтезу ARMABiS-емуляторів у структурах САК з еталонною моделлю (рис.4) та попередню специфікацію ARMA-процесів.

Застосування теоретичних аспектів синтезу ARMABiS-систем дозволяє поєднати одночасне розв'язування завдань забезпечення стійкості і завдань мінімізації функціонала якості (11) при функціонуванні систем в умовах немодельованої динаміки об'єктів керування.

Аналіз перехідних процесів (рис.5) розроблених систем (рис.4) на

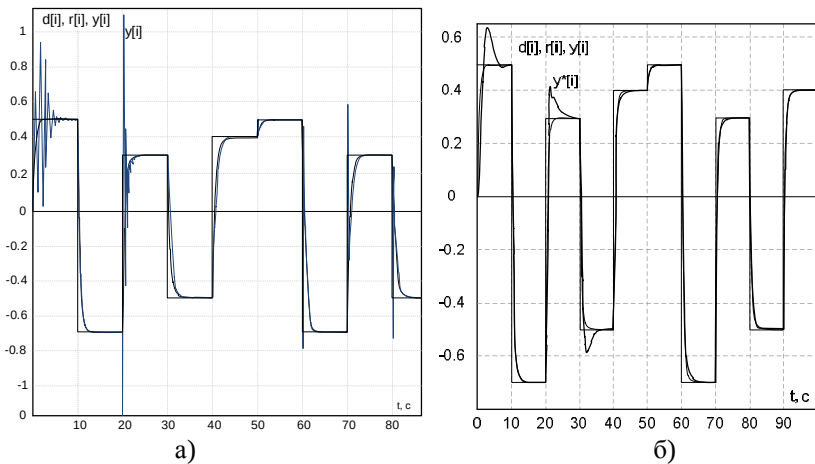


Рис.5. Перехідні процеси в класичній нейромережевій (а) та адаптивній системах керування з ARMABiS-регулятором (б)

прикладях ADL(p,q)-моделей свідчить про підвищення якості адаптації ARMABiS - регуляторів порівнянні з класичним нейрорегулятором на базі Adaline-структури: настроювання ARMABiS-структури ($y^*(t)$) носить монотонний характер з перерегулюванням не більше 10%, статична похибка в сталому режимі відсутня, інтегральна похибка на 60% менша в порівнянні з класичною системою нейрокерування ($y(t)$).

Застосування концепції синтезу адаптивних ARMABiS-систем автоматичного керування передбачає розробку методу аналітичного дослідження систем автоматичного керування з нейроморфними структурами з метою визначення: характеристичних рівнянь ARMABiS-моделей, функцій відгуку та передаточних функцій ARMABiS-структур, частотних спектрів ARMABiS-емуляторів та регуляторів. В основу даного методу запропоновано покласти аналітичне визначення передаточних функцій нейроморфних структур у сталих та перехідних режимах роботи.

Розроблений метод використано при аналітичному дослідженні динаміки параметричних змін передаточних функцій ARMABiS-структур та відповідних частотних функцій спектральної щільності (рис.6)

$$H(\omega) = \frac{A(\omega)}{B(\omega)} = \frac{\mu \cdot (\gamma_0 + \gamma_1 e^{-j\omega\Delta t} + \gamma_2 e^{-j\omega 2\Delta t})}{1 - 2(1-\mu)e^{-j\omega\Delta t} + (1-\mu)e^{-j\omega 2\Delta t}} \quad (22)$$

в процесі адаптації коефіцієнтів регресійного лага. Результати дослідження дозволили зробити такі висновки: процес адаптації розробленої ARMABiS-структури не викликає зміну умовної частоти зрізу

$$\text{спектру } \omega'_c, |X(j\omega)| = \Delta A_c,$$

відповідно дискретизація ARMABiS-структури з частотою $\omega_0 \geq 2\omega_c$ не буде призводити до втрати інформації; верхня межа робочого загасання в смузі пропускання складає $\Delta a = -1,1 \text{ dB}$, нижня в смузі затримання $a_0 = -50,5 \text{ dB}$; різниця верхніх меж затухання на початку і після завершення процесу адаптації $\psi \Delta a = 1,02 \text{ dB}$, нижніх: $\xi a_0 = 4,89 \text{ dB}$.

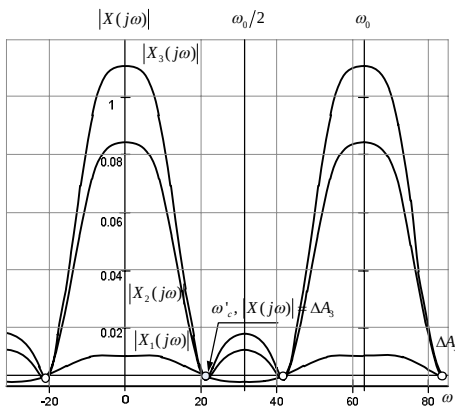


Рис.6. Спектри сигналів ARMABiS-структури в процесі адаптації

З метою визначення залежності основних якісних показників перехідних процесів від зміни коефіцієнта регуляризації ARMABiS-структури (μ) проведено імітаційне моделювання розробленої адаптивної САК з ARMABiS-регулятором (рис.4). Оцінювання якісних показників перехідної

функції САК ґрунтується на використанні комплексного критерію, в якому враховано: відсоткове значення перерегулювання, тривалість перехідного процесу та кількість коливань, які спостерігаються впродовж часу адаптації.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що в площині діапазону варіації коефіцієнта регуляризації $\mu^{AR(p)}$ та швидкості настроювання $h^{MA(q)}$ ARMABiS-структури існує адаптивний рельєф (рис.7), який визначає рівень комплексного критерію якості перехідних характеристик.

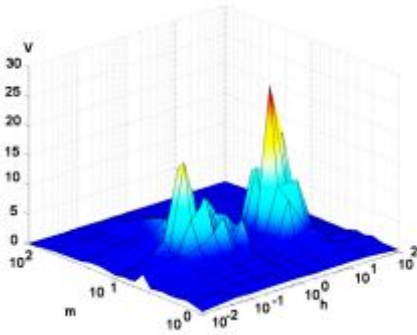


Рис.7. Залежність комплексного критерію якості від коефіцієнтів ARMABiS-структури при довільному керуючому впливі

Наявність глобального екстремуму на адаптивному рельєфі комплексного критерію якості перехідних характеристик свідчить про принципову можливість розробки методики параметричного і структурного синтезу підсистеми оптимального настроювання коефіцієнтів $\mu^{AR(p)}$ та $h^{MA(q)}$ ARMABiS-структури з метою оптимізації комплексного критерію якості системи. Підсистема може бути реалізована на базі використання як класичних ПІД-контролерів, так і з використанням BiS-технологій (ШНМ, fuzzy-систем, генетичних алгоритмів і ін.).

Таким чином розроблена методологія моделювання об'єктів керування, яка заснована на авторегресійних структурах з регуляризацією, дозволила на її базі розробити адаптивний емулятор зі структурою ADL(p,q), який покладений в основу концепції синтезу адаптивних ARMABiS-систем автоматичного керування ТП агломераційного комплексу.

З метою адекватного визначення структурно-параметричних особливостей регуляторів локальних САР параметрів процесів агломераційного комплексу розроблено метод специфікації нейроморфних емуляторів прямої та зворотної динаміки об'єктів керування заснованих на авторегресійних структурах.

П'ятий розділ роботи присвячено розробці концепції синтезу адаптивних ARMABiS-систем автоматичного керування ТП агломераційного комплексу, яка ґрунтується на застосуванні авторегресійних структур з регуляризацією.

З урахуванням функцій автоматичного контролю і керування технологічним процесом спікання та можливості корекції уставок і зміни критеріїв керування САКТП побудовано за ієрархічним тривірневим принципом. У функціональному відношенні САКТП агломерації має

структуру, яка забезпечує функціональність в умовах обробки комплексу взаємозв'язаних завдань. Функціонально розроблена САКТП забезпечує обробку аналогових (вимірювання, оперативний контроль і регулювання) і дискретних (обробка, оперативний облік, керування, сигналізація) сигналів.

Критерієм керування агломераційним комплексом є забезпечення заданої продуктивності кожної агломашини з виробництва агломерату із заданими ТУ показниками його хімічного складу та фізичних властивостей при знижених матеріальних і енергетичних витратах на виробництво.

Визначені критерії керування та результати розробки складових частин багаторівневої адаптивної ARMABiS-системи автоматичного керування ТП дозволили синтезувати функціональну схему керування агломераційним комплексом (рис.8), відповідно до якої, завдання підвищення продуктивності, надійності, ритмічності та конкурентоспроможності виробництва агломерату вирішується за рахунок оптимізації процесу спікання агломерату.

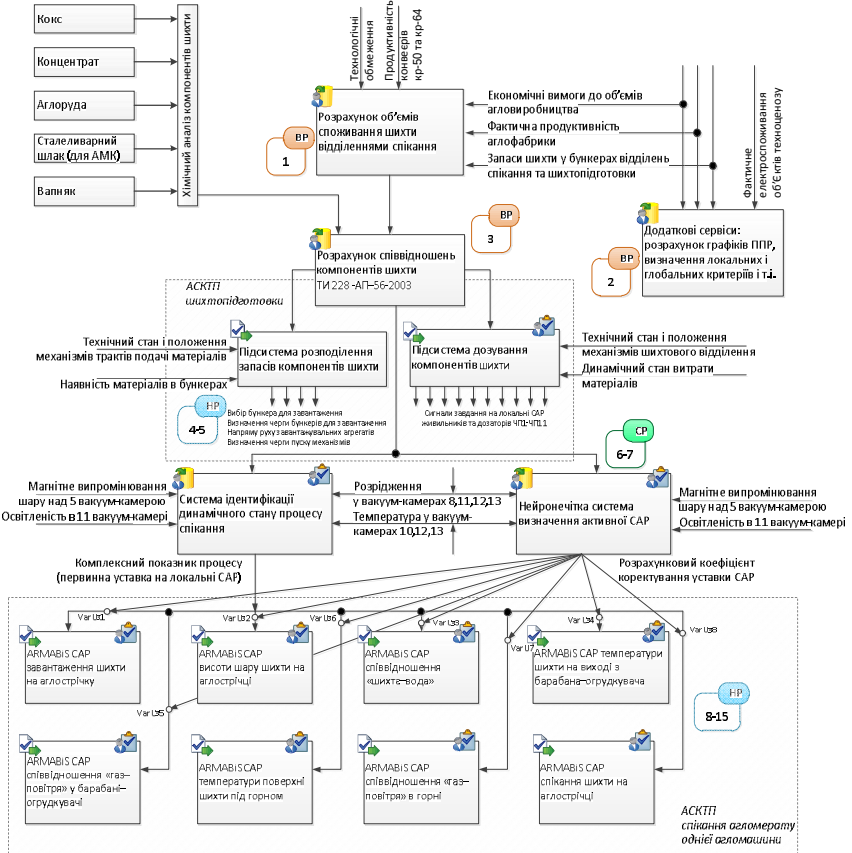


Рис.8. Функціональна схема адаптивної САКТП агломераційним комплексом

Розроблена концепція автоматизації агловиробництва ґрунтується на використанні в якості показника процесу спікання комплексного оцінювання(1) непрямих показників вертикальної швидкості спікання агломерату.

Даний показник дозволяє забезпечити формування сигналів завдання для локальних систем автоматичного регулювання, які при виконанні накладених обмежень забезпечують динамічні характеристики об'єкта керування на базі застосування розроблених адаптивних ARMABiS-структур (8). Технологічна варіація комплексного показника процесу спікання (1) може бути наслідком змін як фізико-хімічних властивостей шихти, так і технологічних умов ведення процесу. З метою експертного визначення ефективного каналу регулювання процесу до функціональної схеми адаптивної САКТП введено нейронечітку підсистему визначення активної САР (рис.3), яка на базі адаптації (5) продукційних правил визначає коефіцієнт коректування уставки локальної САР або їх групи, вихідний параметр яких є причиною зміни комплексного показника процесу (1).

Згідно з розробленою концепцією синтезу адаптивних ARMABiS-систем автоматичного керування, визначено основні етапи створення подібних систем на прикладі САКТП відділення спікання та адаптивної ARMABiS-САР температури поверхні шихти під горном.

Специфікація ARMABiS-елементів. Розроблена методологія синтезу ARMABiS-систем з еталонною моделлю (рис.4) потребує проведення специфікації ARMABiS-елементів на першому етапі синтезу структури. З метою застосування розробленого методу використано експериментальні дані ГЗК ВАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» від 10.02.09р., які відображають розгінну характеристику агломашини (рис.9).

З метою проведення процедури специфікації ARMABiS-елементів використано найбільш характерний діапазон (11:48:47.053 - 11:49:47.053) розгінної характеристики вихідного показника об'єкта керування - температури у 24 вакуум-камері (рис.9). У даний період проведено аварійне гальмування агломашини з одночасним зниженням температури запалювання шихти. Результати аналізу кінцевих різниць перехідної функції вихідного показника об'єкта керування свідчать, що друга кінцева різниця від перехідної функції температури у 24 вакуум-камері виявилася приблизно постійною, і згідно з доведеним твердженням (р.4) для відтворення даної перехідної функції нейроморфними емуляторами ефективним буде використання II-го порядку ARMABiS-моделей виду ADL(2,2):

$$\begin{aligned} t^{\circ}C_{B/K24}[i] = & b_0 v_{AM}[i] + b_1 v_{AM}[i-1] + b_2 v_{AM}[i-2] - \\ & - c_1 t^{\circ}C_{B/K24}[i-1] - c_2 t^{\circ}C_{B/K24}[i-2]. \end{aligned} \quad (23)$$

Типова функціональна схема адаптивних ARMABiS-САР. Проведені статистичні дослідження об'єкта керування за каналом «температура запалювання шихти – температура у 24 вакуум-камері» стали основою в

розробці функціональної схеми адаптивної ARMABiS-CAP температури поверхні шихти під запалювальним горном (рис.10).

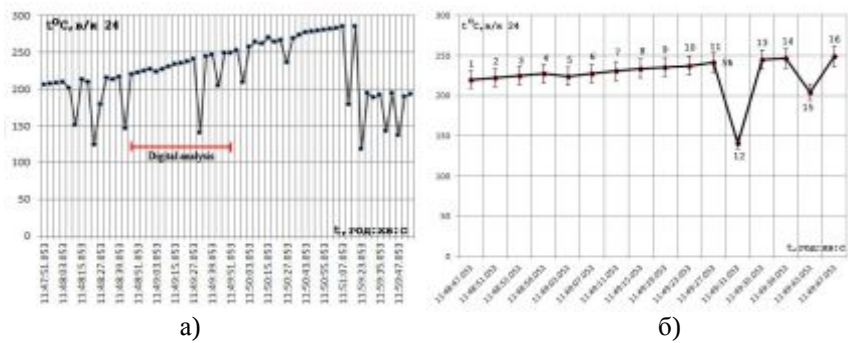


Рис.9. Розгінна характеристика агломашини за температурою у 24 в/к (а), та її частина, яка застосовується для проведення процедури специфікації ARMABiS-елементів (б)

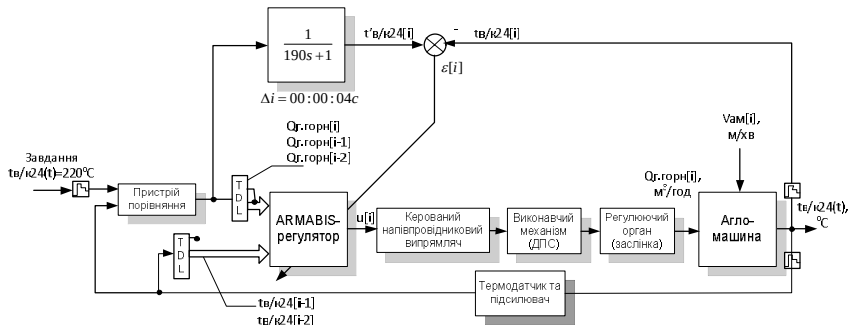


Рис.10. Структурна схема адаптивної ARMABiS-CAP температури поверхні шихти під запалювальним горном

При імітаційному моделюванні розробленої ARMABiS-CAP в якості емулятора об'єкта керування використано повну нелінійну динамічну модель агломашини за каналом «температура запалювання шихти – температура повітря в 24 вакуум-камері», яка є адекватною в технологічно визначених діапазонах роботи агломераційного устаткування (рис.11).

Результати моделювання свідчать про задовільну якість регулювання адаптивною ARMABiS структури ADL(2,2) - CAP температури поверхні шихти під запалювальним горном при варіаціях збурюючого впливу (швидкості аглострічки) та наявності широкополосного гаусівського шуму з відхиленням 1% у каналі вимірювання температури в 24 вакуум-камері.

Результати дослідження дозволили зробити висновок, що підвищення рівня шуму у 10 разів призводить до втрати стійкості системи, відповідно обґрунтовано актуальність завдання розробки додаткових методів та засобів

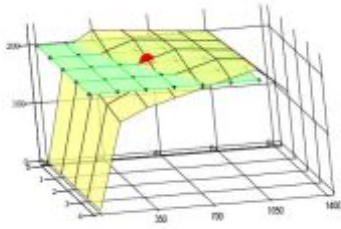


Рис.11. 3-D характеристика агломашины як об'єкта керування в САР температури поверхні шихти під запалювальним горном

включає (рис.12) датчик швидкості аглострічки 10, датчик витрати газу 7, регулювальний прилад, виконавчий механізм та ARMABiS-регулятор, який змінює витрату газу при варіаціях вхідних збурюючих впливів: вологості шихти, вмісту в ній вуглецю тощо.

САР співвідношення «газ–повітря» в горні включено до вторинного контуру ARMABiS-CAP температури поверхні шихти під запалювальним горном, яка підтримує заданий коефіцієнт витрати повітря з метою забезпечення повного згоряння газу.

САР співвідношення «газ–повітря» складається з датчиків витрати газу і повітря 7, 6, регулювального приладу 8, приладу, що задає 13 та вентиляторів повітря.

Для обмежень температури, які визначаються стійкістю футерівки горна та необхідним ступенем запалювання верхнього шару шихти, в систему додатково введено контур корекції температури, який складається з пірометра 1, датчика температури 11, приладу, що задає 9 та коректувального приладу 12 (рис.12). Контур корекції температури є зовнішнім і впливає на сигнал контуру співвідношення «газ–повітря», відповідно сумарний сигнал змінює витрату повітря, що призводить до корекції температури в горні.

Розроблена адаптивна ARMABiS-CAP температури поверхні шихти під запалювальним горном додатково відпрацьовує короткотривале гальмування та пуск, падіння тиску газу і повітря. Відповідно до прототипу при короткотривалому гальмуванні агломашины для збереження бортів палет від перегріву та оплавлення поверхні шихти передбачено режим «малого газу». Дросель «малого газу» 4 за сигналом, який свідчить про гальмування агломашины, автоматично зменшує витрату газу на горно до кількості, яка визначається уставкою витратоміра газу 7 та забезпечує підтримку факела. Водночас зменшується температура в горні за рахунок зміни коефіцієнта витрати повітря, що забезпечується введенням у командне коло ARMABiS-

спрямованих на ліквідацію інтерференційних шумів у каналах передачі даних САКТП.

Типова структурна схема адаптивних ARMABiS-CAP. В основу ARMABiS-CAP температури поверхні шихти під запалювальним горном покладено метод керування витратою газу, що подається в горно.

Відповідно до розробленого методу основний контур автоматичного регулювання побудовано на типовому обладнанні агловиробництва і

регулятора контакту витратоміра повітря 6, який розмикається при витраті, яка забезпечує необхідний надлишок повітря.

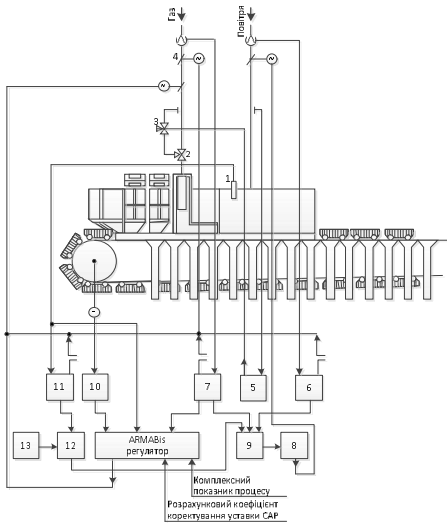


Рис.12. Структурна схема ARMABIS-САР температури поверхні шихти під запалювальним горном

Для підтримки заданої продуктивності агломераційної машини в початковий період після пуску витрата газу визначається автоматично з метою забезпечення технологічно визначеної температури розігріву горна. На наступному етапі при досягненні робочої температури в горні надходить команда на пуск агломашини. У системі передбачено автоматичну відсічку газу й автоматичне гальмування агломашини при зниженні тиску газу і повітря.

ARMABiS-система ліквідації інтерференційних шумів у каналах передачі даних САКТП. Відомо, що контроль параметрів технологічних процесів гірничо-збагачувальних підприємств відбувається за наявності шумів у каналах спостереження, що

потребує додаткової адаптивної фільтрації інтерференційних шумів.

Проведені промислові випробування адаптивної системи ліквідації інтерференційних шумів у каналах передавання даних САКТП, побудованої на базі мережі Вольтеррі, дозволили зробити висновок, що в умовах виробництва використання даної нейроморфної структури є неефективним, оскільки процес адаптації мережі становить 6-8с і з урахуванням часу дискретизації розроблених локальних САКТП 4с призводить до втрати адаптивних властивостей системи ліквідації інтерференційних шумів та, відповідно, до виходу локальних САР за межі стійкості.

З метою ліквідації вказаного недоліку в роботі пропонується в якості базової структури адаптивної системи ліквідації інтерференційних шумів використати розроблену ARMABiS-систему, яка відрізняється від відомих нейроморфних структур підвищеною швидкістю в процесі адаптації та гарантованою стійкістю. На рис.13. наведено результати імітаційного моделювання ARMABiS-ідентифікації при адаптації за зашумленими сигналами амплітудою 10%: фактична реакція об'єкта керування (рис.13,а), зашумлений сигнал виходу об'єкта (рис.13,б), процес навчання ARMABiS-емулятора і похибка (рис.13,в) та результати нейроідентифікації (рис.13,г).

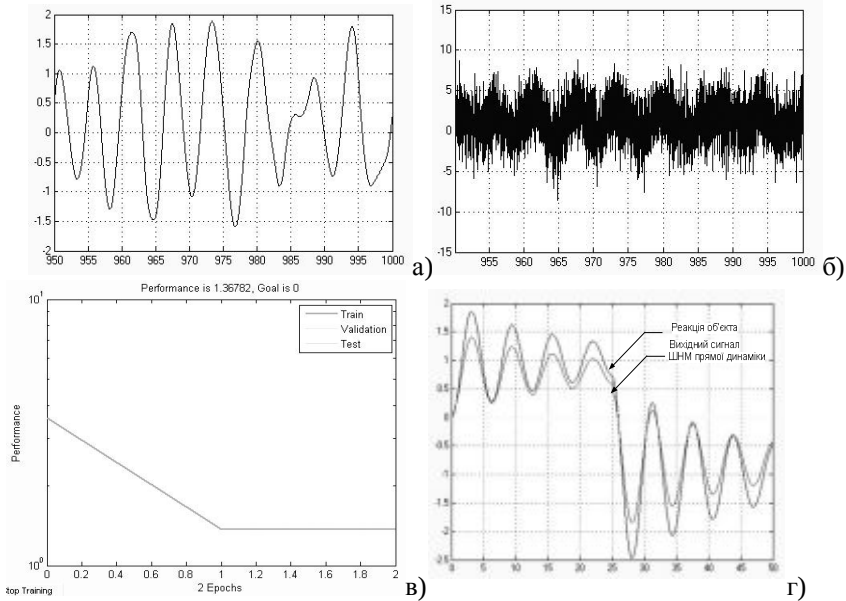


Рис.13. Результати ARMABiS-ідентифікації при адаптації за зашумленими сигналами зв'язку

Результати промислового випробування розробленої ARMABiS-системи ліквідації інтерференційних шумів у каналі контролю температури запалювання шихти САКТП спікання агломерату в умовах ВАТ «ПівдГЗК» свідчать про задовільну якість ліквідації шумів (час дискретизації - 4с), яка є достатньою для забезпечення належних умов функціонування адаптивної САКТП агловиробництва.

Нейронечітка система визначення активної САР. Відповідно до розробленої концепції автоматизації агломераційного виробництва комплексу САКТП спікання агломерату реалізовано за багаторівневою структурою, на нижніх рівнях якої використано САР: завантаження шихти на аглострічку; висоти шару шихти на аглострічці; співвідношення «шихта-вода»; температуру шихти на виході з барабана-огрудкувача; співвідношення «газ-повітря» у барабані-огрудкувачі; температури поверхні шихти під запалювальним горном; співвідношення «газ-повітря» в горні; спікання шихти на аглострічці.

Як основний керований параметр у розроблених САР використано комплексний показник динамічного стану ТП та додаткові непрямі показники, які дозволяють в автоматичному режимі розрахувати коефіцієнт коректування уставки САР, що в даних технологічних умовах забезпечує

і робастного адаптивного ARMABiS-регулятора, який використовує поточне оцінювання вектора стану та параметрів моделі об'єкта керування.

У розроблених адаптивних ARMABiS-CAP нейронечіткі субсистеми використовуються в якості надбудови до локальних і виконують функції корегування уставки на базі аналізу динаміки зміни Якобіана системи $\frac{\partial y(t+1)}{\partial y(x)}$ за вихідними параметрами конкретної ARMABiS-CAP (рис.15).

Останнє дозволяє обмежити робочий діапазон варіювання керуючих впливів з урахуванням дотримання умов стійкості системи та здійснювати поточне оцінювання вектора стану у випадковому середовищі функціонування системи й оперативно визначати ефективний канал керування з урахуванням техніко-економічного критерію (24).

На рис.15 наведено керуючі та керовані параметри локальних ARMABiS-CAP процесу спікання агломерату, які визначено відповідно до Технологічної інструкції ТИ 228-АП-56-2003.



Рис.15. Керуючі та керовані параметри локальних ARMABiS-CAP процесу спікання агломерату визначення активної САР

Елементна база та інструментальні засоби реалізації адаптивних ARMABiS-CAP. Елементна база первинних датчиків та виконавчих механізмів розробленої адаптивної САКТП з локальними ARMABiS-CAP включає такі елементи: 1) первинні датчики виміру: температури підігріву шихти в БШП та її запалювання – ТЕРА 50-РК15; температури в колекторі, вакуум-камерах та змішувачі - ТХК-2088, БУ-11; температури поверхні шихти – ДПР-1; витрати газу і повітря на горно та змішувач – Сапфір-22; тиску повітря і газу на горно та змішувач – Сапфір-22; розрідження в колекторі та вакуум-

камерах – Сапфір-22; висоти заповнення бункера та шару шихти на аглострічках – Vegason 73-1, 61; швидкості аглострічки – Mitsubishi FR-A540; магнітного випромінювання шару шихти – LakeShore 460; вологості шихти – БНС-7652М;2) виконавчі механізми адаптивної САКТП: приводи тарілчастого живильника (дозування повернення відповідно до ТП), барабанного живильника(дозування шихти), аглострічки та човникового розподільника - Mitsubishi FR-A540; регульований клапан витрати газу, води і повітря на змішувач та газу і повітря на горно - КМРО.

В якості апаратної основи адаптивної САКТП використано чотири контролери ADAM5000 під керуванням вбудованого виконавчого модуля Мікро TRACE MODE. До системи надходять сигнали від 16 дискретних і 50 аналогових датчиків різних типів. З контролерів інформація по інтерфейсу RS-485 передається до монітора реального часу TRACE MODE на 512 точок вводу-виводу, який виконує функції високонадійного сервера, а також є основним АРМ оператора. Підготовку виробничих звітів на основі архівних даних, що накопичуються системою моніторингу, реалізовано за допомогою сервера документування TRACE MODE.

В АРМ відображаються всі контрольовані об'єкти, підключені до сервера вводу/виводу по наявних каналах зв'язку. Ведеться журнал аварій, в який автоматично заносяться записи із зазначенням часу про аварію на об'єкті, реакції на подію диспетчером системи, всі дії диспетчера з керування системою тощо.

Розроблена система забезпечує архівацію всіх подій з об'єктами керування, глибина архіву визначається ємністю жорсткого диска на сервері, також є можливість обміну даними з сервером промислових баз даних за ODBC протоколом. Доступ до інформації обмежується політикою безпеки операційної системи Windows 2003 Server.

Всі вузли адаптивної САКТП агломераційним процесом об'єднані мережею Ethernet з пропускною спроможністю 100 Мбіт. Сервер вводу/виводу також є мережевим шлюзом між промисловою локальною обчислювальною мережею (ЛВС) і ЛВС рівня керування цеху.

ARMABiS системи керування реалізовано у вигляді програмного коду, що підключається як бібліотеки до SCADA системи.

Основні характеристики адаптивної САКТП агломераційним комплексом, яка розроблена на основі авторегресійних структур: автоматичне керування технологічним процесом із завданням режиму роботи; архівація інформації про стан технологічного процесу та витрати енергоресурсів; графічне подання даних про динаміку технологічного процесу; сигналізація про аварійні режими роботи або вихід параметрів за допустимі межі; можливість ручного керування виконавчими механізмами; архівація історії технологічного процесу; документування.

Таким чином, розроблено метод адаптивного керування технологічним процесом спікання агломерату з параметричною адаптацією локальних регуляторів, що дозволяє зменшити амплітуду коливань вихідних параметрів

процесу у середньому на 0,8% за рахунок компенсації неконтрольованих збурень шляхом регуляризації авторегресійних структур та забезпечити узгоджену роботу технологічних агрегатів відділення спікання за рахунок застосування розроблених адаптивних систем керування з регуляторами зі структурою ADL(p,q) які пов'язані з системами корекції їх уставок

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна наукова проблема, яка полягає у вдосконаленні принципів адаптивного керування агломераційним комплексом на підставі: подальшого розвитку підходу до синтезу систем визначення динамічного стану нелінійних нестационарних процесів в умовах відсутності математичних моделей об'єктів в аналітичному вигляді, за рахунок розробки методу формалізації технологічних ситуацій та ідентифікації параметрів моделей об'єктів керування агломераційного комплексу; подальшого розвитку методології моделювання об'єктів керування, яка заснована на авторегресійних структурах з регуляризацією; розробки адаптивних алгоритмів керування технологічними процесами агломераційного комплексу; розробки методу специфікації нейроморфних емуляторів прямої та зворотної динаміки об'єктів керування заснованих на авторегресійних структурах за відсутності їх моделей в аналітичному вигляді; реалізації адекватного визначення структурно-параметричних особливостей регуляторів локальних систем автоматичного регулювання параметрів процесів агломераційного комплексу; врахування стану технологічних підсистем та динаміки зміни непрямих параметрів процесу спікання агломерату в процесі керування, за рахунок розвитку підходу пов'язаного з визначенням корекції уставок регуляторів локальних САР параметрів процесів агловиробництва; розробленого методу адаптивного керування технологічним процесом спікання агломерату з параметричною адаптацією локальних регуляторів, що разом забезпечує узгоджену роботу технологічних агрегатів відділення спікання та компенсацію неконтрольованих збурень і, як наслідок, дозволяє гарантувати надійне функціонування системи керування агломераційним комплексом в умовах дії значних параметричних та координатних збурень, що призводить до підвищення конкурентоспроможності агломераційного виробництва.

За результатами проведених досліджень сформульовані та обґрунтовані такі наукові висновки:

1. Аналіз стану автоматизації керування ТП агломераційного комплексу показав, що ефективне функціонування адаптивних систем автоматичного керування в умовах немодельованої динаміки об'єктів керування можливе при застосуванні методів теорій нечітких множин та штучних нейронних мереж для формування керуючих впливів, що ставить нові науково-технічні завдання, пов'язані з аналізом та синтезом нейроморфних структур, зокрема завдання визначення динамічного стану об'єктів керування для побудови

адаптивних регуляторів, оптимізації їх параметрів та структури, забезпечення гарантованої стійкості системи автоматичного керування.

2. Розроблено метод формалізації технологічних ситуацій і стратегії ідентифікації параметрів моделі об'єкта керування, який реалізований на базі використання удосконаленої методики статистичного настроювання параметрів функцій приналежності змінної довільному нечіткому терму, і дозволяє проводити адаптацію емулятора динаміки об'єкта при використанні комплексу систем автоматичного контролю непрямих показників процесу. Розроблена на основі зазначеного методу система визначення динамічного стану технологічних процесів дозволяє отримати такі результати:

- точність формування функцій приналежності змінної довільному нечіткому терму при використанні стандартної аналітичної форми запису підвищується на 35% в порівнянні з методом Сааті за рахунок відсутності похибки зведення графічного подання ФП до стандартного виду;

- впровадження в агломераційне виробництво методу визначення динамічного стану процесу спікання агломерату на базі існуючих систем автоматичного контролю непрямих показників дозволяє підвищити точність оцінки величини шару спеченого агломерату на аглострічці, як координати процесу в середньому на 12% за рахунок використання колективного вирішального правила та визначити стадію завершення процесу спікання з максимальною похибкою 2,5%, що призводить до підвищення продуктивності агломашин на 0,91%; за умови підтримки заданої якості агломерату;

- розроблена система визначення динамічного стану процесу спікання агломерату надійно функціонує в усіх можливих режимах роботи технологічного обладнання за наявності значних параметричних та координатних збурень;

- розроблений алгоритм формалізації функцій приналежності дозволяє в on-line режимі проводити параметричний синтез сформованих функцій приналежності системи ідентифікації в умовах відсутності математичних моделей об'єктів в аналітичному вигляді.

3. На основі розробленого методу синтезу нейронечітких емуляторів середнього рівня адаптивних САКТП реалізовано інформаційні системи визначення активної САР та нейронечіткого планування графіків проведення планово-попереджувальних ремонтів, впровадження яких в умовах ВАТ «ПівніГЗК» та ВАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» дозволило:

- підвищити точність визначення причини зміни стадії завершення процесу спікання, що привело до зменшення дисперсії основного непрямого показника – різниці температур в останніх вакуум-камерах в середньому на 10,8%;

- підвищити точність прогнозу електроспоживання підрозділами ВАТ «ПівніГЗК», забезпечивши MAPE-похибку 2,54%;

- покращити якість квантитативного короткотривалого нейронечіткого прогнозування енергоспоживання основними цехами ВАТ «ПівніГЗК» на 15% в порівнянні з відомими структурами прогнозу;

- отримати гірничо-збагачувальним підприємствам додаткову економію на рівні до 1% від обсягів щорічних витрат на електроенергію, що споживається.

4. Розроблений метод аналітичного дослідження нечітких систем автоматичного керування, який ґрунтується на попередньому визначенні оціночного коефіцієнта нелінійної залежності блоків нечіткого висновку, забезпечує підвищення точності процедури аналізу на 20% у порівнянні з відомими методиками.

5. Розроблено авторегресійну структуру з регуляризацією (ARMABiS-емулятор) яка характеризується асимптотичною стійкістю та адаптивними властивостями, отриманими за рахунок настроювання вагових коефіцієнтів регресійного лага (MA(p)-складова) на базі модифікованого градієнтного методу мінімізації квадратичного функціонала, а умова стійкості забезпечується настроюванням вагових коефіцієнтів критеріального лага (AR(q)-складова). Застосування ARMABiS-елементів у структурах адаптивних систем автоматичного керування забезпечує підвищення якості адаптації регулятора в системі керування з еталонною моделлю. Так адаптація ARMABiS-структури носить монотонний характер з перерегулюванням не більше 12,5%, статична похибка відсутня, інтегральна похибка на 59,5% менша в порівнянні з класичним нейрорегулятором на базі Adaline-структури.

6. Запропонований метод аналізу систем автоматичного керування з нейроморфними структурами, який дозволяє в умовах немодельованої динаміки об'єктів керування визначати: характеристичні рівняння ARMABiS-моделей, функції відгуку та передаточні функції ARMABiS-структур, частотні спектри ARMABiS-емулаторів та регуляторів.

7. Результати аналітичного дослідження ARMABiS-структур дозволили визначити умову, при якій забезпечується відсутність накладення зміщених спектрів, що у свою чергу дозволяє визначити частоту квантування за часом ARMABiS-структури, яка не призводить до втрати інформації.

8. Відповідно до розробленої методики структурного та параметричного синтезу адаптивних ARMABiS-структур визначено, що в площині діапазону варіації коефіцієнта регуляризації авторегресійних структур та швидкості настроювання існує адаптивний рельєф, який визначає рівень комплексного критерію якості перехідних характеристик об'єктів керування. Доведено, що настроювання оптимальних параметрів авторегресійної структури з регуляризацією може бути проведено з використанням класичних ПІД-регуляторів або на основі застосування ViS-технологій.

9. Розроблено метод специфікації нейроморфних структур у системах автоматичного керування, який ґрунтується на визначенні і дослідженні кінцевих різниць перехідної функції об'єктів керування. Метод дозволяє

визначати оптимальну структуру нейроморфних емуляторів, орієнтованих на відтворення прямої та зворотної динаміки об'єктів керування за відсутності їх моделей в аналітичному вигляді.

10. Отримав подальший розвиток метод синтезу систем автоматичного керування, орієнтованих на компенсацію впливу запізнення об'єкта за умови відсутності його математичної моделі в аналітичному вигляді.

11. Запропонована концепція структурного та параметричного синтезу адаптивних систем керування технологічним процесом спікання агломерату, яка ґрунтується на поєднанні локальних адаптивних ARMABiS-CAP з системами нейронечіткої емуляції для визначення активної CAP, дозволила на практиці реалізувати теорему розділення О.А. Красовського, яка теоретично обґрунтовує можливість роздільного синтезу інформаційної і керуючої частин САК.

12. Застосування нейронечітких систем визначення активних CAP в корегуючому контурі адаптивної системи керування технологічним процесом спікання агломерату забезпечує зменшення дисперсії комплексного показника процесу в середньому на 14%.

13. Розроблена система адаптивного керування технологічним процесом спікання агломерату з параметричною адаптацією локальних регуляторів забезпечує зменшення дисперсій регульованих координат технологічних ліній до 35% у порівнянні з САК, синтезованими за класичними методами при компенсації неконтрольованих збурень відділення спікання агломерату.

14. Застосування в адаптивних системах керування технологічного процесу спікання агломерату авторегресійних структур з регуляризациєю (ARMABiS-регуляторів) забезпечує підвищення точності відпрацювання заданого технологічними умовами режиму (відносна похибка регулювання за комплексним показником у 4 рази менша), зменшення перерегулювань (у 5 разів) у порівнянні з системою керування, синтезованою за традиційною методикою.

15. Розроблені в дисертації методи, засоби та підходи до синтезу та аналізу адаптивних систем автоматичного керування технологічними процесами перевірені на характерних об'єктах: ВАТ «Марганецький гірничозбагачувальний комбінат» - розгалужені конвеєрні лінії шахт і рудників; ВАТ «Криворізький залізорудний комбінат» - ТП розвантаження шахтних вагонеток, розгалужені конвеєрні лінії шахт і рудників, ТП видобутку та транспортування (впровадження САКТП забезпечує зменшення обсягів невиробничих витрат на 10-13% від загального обсягу); ВАТ «Південний гірничозбагачувальний комбінат» - ТП спікання агломерату в умовах АФ№1 з річним обсягом продуктивності за агломератом 2,4 млн. т. (впровадження адаптивної САКТП забезпечує отримання очікуваного річного економічного ефекту 796381,6 грн.); ВАТ «Північний гірничозбагачувальний комбінат» - впровадження систем визначення уставок локальних систем нижнього рівня керування ТП та нейронечіткого планування графіків проведення планово-попереджувальних ремонтів дозволяє знизити питому витрату електроенергії

на 0,5-1%; ВАТ «Суша Балка» - поточно-транспортний комплекс (впровадження системи дозволило підвищити продуктивність на 5% та якість продукції на 3%, а також знизити енерговитрати на 6%); ВАТ «АреслорМіттал Кривий Ріг» – агломераційний комплекс ГЗК (впровадження розробленої адаптивної САК ТП спікання агломерату дозволяє забезпечити задані якісні показники готового продукту та підвищити середньодобову продуктивність агломераційного комплексу на 0,91%) що є практичним свідченням їх реалізації в умовах керування об'єктами з немодельованою динамікою.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Щокін В. П. Інтелектуальні системи керування: аналітичний синтез та методи дослідження / Вадим Петрович Щокін. – Кривий Ріг: ФОП Чернявський, 2010. – 264 с.
2. Щокін В. П. Математична модель агломераційного процесу / В. П. Щокін // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. – Кременчук, 2002. – № 1/2002(12) – С. 379–381.
3. Щокін В. П. Проблеми синтезу автоматизованих систем нечіткого управління технологічним процесом агломерації в умовах аглофабрики № 2 ВАТ «ПГЗК» / В. П. Щокін // Науковий вісник НГАУ. – 2003. – № 7. – С. 79–81.
4. Щокін В. П. Модель автоматичної системи управління дозуванням руди у аглошихті з нечітким регулятором електропривода живильника / В. П. Щокін // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя : ЗДТУ, 2003. – № 1. – С. 47–51.
5. Щокін В. П. Оптимізація управління агломераційним комплексом / В. П. Щокін, О. В. Щокіна // Науковий вісник НГАУ. – 2002. – № 5. – С. 54–55.
6. Щокін В. П. Система нечіткого управління індивідуальним дозуванням концентрату у технологічному процесі підготовки аглошихти / В. П. Щокін // Науковий вісник НГАУ. – 2003. – № 11. – С. 86–90.
7. Щекин В. П. Технологические аспекты автоматизации и опыт внедрения систем управления процессом агломерации / В. П. Щекин, С. Н. Мисько, П. Д. Мищенко // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2005. – № 8. – С. 114–116.
8. Щокін В. П. Інтегрована інформаційно-керуюча система виробництва агломерату / В. П. Щокін, С. М. Мисько, П. Д. Міщенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 4 (16). – С. 8–10.
9. Щокін В. П. Застосування нейронечітких емуляторів в інтегрованій інформаційно-керуючій системі виробництва агломерату / В. П. Щокін // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2005. – № 6. – С. 179–183.

10. Щокін В. П. Автоматизована система управління технологічним процесом шихтопідготовки агломераційного виробництва в умовах ГЗК ВАТ «МітталСтіл Кривий Ріг» / В. П. Щокін, В. М. Нечитайло, С. М. Мисько, А. І. Шнико // Гірничя електромеханіка і автоматика. – 2007. – № 78. – С. 49–56.
11. Щекин В. П. Адаптивная система нижнего уровня АСУТП агломерации / В. П. Щекин // Електроінформ : науково-технічний журнал. – Тематичний вип. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика. – Львів : ЕКОінформ, 2009. – С. 201–202.
12. Щокін В. П. Метод аналітичного конструювання закону адаптації нейронечітких структур в інтелектуальних гібридних системах автоматичного управління / В. П. Щокін // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2006. – № 12. – С. 131–135.
13. Щокін В. П. Алгоритм настроювання бази правил нейронечітких емуляторів зворотної динаміки об'єктів автоматизації / В. П. Щокін // Наукові праці ДонНТУ. – Донецьк, 2006. – № 12 (113). – С. 292–297.
14. Щокін В. П. Метод структурного синтезу нечіткого емулятора нелінійної динамічної системи / В. П. Щокін, О. В. Щокіна // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2004. – № 3. – С. 20–24.
15. Щокін В. П. Метод адаптації нейронечіткого контролеру в структурі інтелектуальної системи управління динамічними об'єктами / В. П. Щокін // Гірничя електромеханіка і автоматика. – 2005. – № 74. – С. 64–70.
16. Щокін В. П. Адаптивний нейронечіткий емулятор динамічних об'єктів / В. П. Щокін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 5/2(17). – С. 37–40.
17. Щокін В. П. Структура і алгоритм функціонування адаптивної системи автоматичного керування на базі нейронечіткої мережі Ванга-Менделя / В. Д. Сидоренко, В. П. Щокін // Науковий вісник НГАУ. – 2006. – № 1. – С. 74–77.
18. Щокін В. П. Метод формалізації функцій приналежності нечітких нейромережевих емуляторів нелінійних динамічних систем / В. П. Щокін // Науковий вісник НГАУ. – 2004. – № 7. – С. 85–87.
19. Щокін В. П. Алгоритм адаптації нейронечітких емуляторів при застосуванні ефекту поділу руху в адаптивних нейромережевих системах управління / В. П. Щокін // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2005. – № 4. – Т. 1. – Ч. 1. – С. 47–49.
20. Щокін В. П. Метод самоорганізації нейронечітких структур інтелектуальних систем автоматичного керування / В. П. Щокін // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2006. – № 1. – С. 65–70.
21. Щокін В. П. Ефективний метод динамічного настроювання параметрів функцій приналежності нейронечітких емуляторів зі структурою Ванга-Менделя / В. Д. Сидоренко, В. П. Щокін, О. В. Щокіна // Теоретична електротехніка. – Львів, 2005. – № 85. – С. 161–166.
22. Щекин В. П. ААРМА-эмуляторы динамического состояния нелинейных нестационарных систем / В. П. Щекин, О. В. Щекина // Вісник

КДПУ ім. М. Остроградського. – Кременчук : КДПУ, 2009. – № 3(56).– Ч. 1. – С. 127–130.

23. Щекин В. П. Структурный и параметрический синтез адаптивных ARMA-моделей динамических систем / В. П. Щекин // Вестник ХНТУ. – 2009. – № 1(34). – С. 389–398.

24. Щокін В. П. Метод синтезу дворівневої інтелектуальної системи автоматичного управління складними технологічними процесами / В. Д. Сидоренко, В. П. Щокін // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2004. – № 5. – С. 3–7.

25. Щокін В. П. Інтелектуальна система управління динамічними багатовимірними об'єктами / В. Д. Сидоренко, В. П. Щокін, О. В. Щокіна // Науковий вісник НГАУ. – 2005. – № 10. – С. 83–85.

26. Щокін В. П. Оптимізація структури бази правил нейронечітких емуляторів зворотної динаміки об'єктів керування / В. П. Щокін // Вісник Сумського державного університету. – 2005. – № 9 (81). – С. 115–123.

27. Shchokin V. Effective method of dynamic adjustment of membership function's parameters of fuzzy-neural emulators and controllers / V. Shchokin, V. Sidorenko, A. Kuzmenko, O. Shchokina // Proceedings of the XIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering. – Lviv, 2005. – P. 249–251.

28. Щокін В. П. Результати розробки методу синтезу інтелектуальних гібридних систем автоматичного управління технологічними процесами / В. П. Щокін // Гірничя електромеханіка і автоматика. – 2005. – № 74. – С. 64–70.

29. Щокін В. П. Метод самоорганізації нечітких систем на базі алгоритму таксономії класу FOREL / В. П. Щокін // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2007. – № 16. – С. 106–110.

30. Щекин В. П. Результаты разработки алгоритма нечеткого логического вывода Modify Mamdani / В. П. Щекин, А. С. Кузьменко // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2007. – № 17. – С. 129–132.

31. Щокін В. П. Метод аналітичного дослідження систем керування з нечіткою логікою / В. П. Щокін // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2008. – № 20. – С. 159–165.

32. Щекин В. П. Метод исследования интеллектуальных систем управления / В. П. Щекин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2008. – № 30. – С. 211–212.

33. Щокін В. П. Нейронечітка модель процесу електроспоживання в структурі системи прогнозування енергетичних аудитів на енергоємних об'єктах технологічних комплексів / В. Д. Сидоренко, В. П. Щокін // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2006. – № 14. – С. 97–101.

34. Щокін В. П. Базовий алгоритм функціонування системи нейронечіткого планування енергетичного аудита на об'єктах енергоємних виробництв / В. Д. Сидоренко, В. П. Щокін // Гірничя електромеханіка і автоматика. – 2006. – № 76. – С. 18–23.

35. Щокін В. П. Нечітка нейронна мережа з TSK-структурою в прогнозуванні електроспоживання технологічними комплексами / В. П. Щокін // Електротехніка та електроенергетика / ЗДТУ. – Запоріжжя, 2004. – № 1. – С. 79–81.

36. Щокін В. П. Метод короткотривалого нейронечіткого прогнозу електроспоживання підрозділами ВАТ «ПівніГЗК» / В. П. Щокін, А. С. Кузьменко, О. В. Щокіна // Праці ЛВ МАІ. – Луганськ, 2007. – № 1 (14). – С. 84–89.

37. Щокін В. П. Розвиток теоретичних основ планування енергетичних аудитів на електромеханічному обладнанні енергоємних виробництв / В. Д. Сидоренко, В. П. Щокін, О. В. Щокіна // Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2007. – № 11. – Ч. 1(117). – С. 177–181.

38. Щокін В. П. Динамічне моделювання економічних систем / В. П. Щокін, О. В. Щокіна // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 1/2(31). – С. 66–70.

39. Щекин В. П. Эконометрическая antnet-модель с распределенным лагом / В. П. Щекин, О. В. Щекіна, С. В. Сидоренко // Разработка рудных месторождений. – 2010. – № 93. – С. 158–163.

40. Щекин В. П. Метод оцінки максимального запізнення елементів фільтрованого входу нейроемуляторів з зовнішньою динамікою / В. П. Щекин // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – 2008. – № 2(22). – С. 164–171.

41. Щокін В. П. Оцінка ретроспективної глибини вектору стану нейромережових і fuzzy емуляторів багатомірних (nD) систем / В. П. Щокін // Електроінформ. – 2009. – № 2. – С. 19–23.

42. Щокін В. П. Модифікована форма генетичного алгоритму для проведення параметричного синтезу асимптотичностійких, інтелектуальних систем керування технологічними процесами / В. П. Щокін, О. В. Щокіна // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2005. – № 7. – С. 159–162.

43. Щокін В. П. Аналітичний синтез та метод дослідження інтелектуальних САК / В. П. Щокін // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – С. 236–237.

44. Щокін В. П. ARMABIS-моделі в системах управління / В. П. Щокін, О. В. Щокіна // Новое в технологии и технике переработки минерального сырья. Сб. науч. тр. Механообрчермет. – Кривой Рог, 2010. – С. 221–229.

45. Щокін В. П. Результати впровадження АСКТП шихтопідготовки агломераційного виробництва в умовах ГЗК ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» / В. П. Щокін, В. М. Нечитайло, М. З. Кваско, В. В. Гуз // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2010. – № 1(37). – С. 219–224.

46. Щокін В. П. Передаточні функції нейромережових ARMABIS-емуляторів динаміки об'єктів керування / В. П. Щокін, О. В. Щокіна // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2010. – № 26. – С. 221–225.

47. Щокін В. П. Функції спектральної щільності ARMA-BIS-структур / В. П. Щокін // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2010. – № 3/2010(62). – Ч. 1. – С. 165–168.

48. Щокін В. П. Передумови до синтезу комплексної автоматизованої системи управління технологічним процесом агломерації / В. П. Щокін, О. В. Щокіна, О. А. Гуляєва // Науковий вісник НГАУ. – 2002. – № 3. – С. 89–92.

49. Щокін В. П. Методологія синтезу інтелектуальних гібридних систем автоматичного управління технологічними процесами / В. П. Щокін, С. М. Чернякова, О. В. Щокіна, М. Л. Барановська // Академический вестник КрТО Международной Академии компьютерных наук и систем. – 2006. – № 17–18. – С. 46–50.

50. Деклараційний патент від 06.02.2006 : Спосіб одержання агломерату : деклараційний патент 14981 Україна, МПК (2006) C22B 1/16 / В. Д. Сидоренко, В. П. Щокін (Україна). – № u2005 10498 ; опубл. 15.06.2006, бюл. № 6.

51. Деклараційний патент від 06.02.2006 : Спосіб одержання агломерату : деклараційний патент 14980 Україна, МПК (2006) C22B 1/16 / В. Д. Сидоренко, В. П. Щокін, О. В. Щокіна (Україна). – № u2005 10497 ; опубл. 15.06.2006, бюл. № 6.

Особистий внесок здобувача в роботи, опубліковані в співавторстві: [5, 7, 8, 10, 14] – розробка принципів автоматичного керування; [17, 21, 22, 24]– вибір наукового напрямку, розробка математичних моделей; [25, 27, 30, 33, 34] – обґрунтування планів і методів досліджень; [36–39, 42, 44–46, 48–51] – розроблення принципів адаптивного керування на основі авторегресійних структур.

АНОТАЦІЯ

Щокін В. П. Адаптивне керування агломераційним комплексом на основі авторегресійних структур з регуляризацією. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2012.

Дисертацію присвячено вдосконаленню принципів адаптивного керування агломераційним комплексом на підставі застосування методів та засобів аналізу динамічного стану технологічних процесів реалізованих за рахунок визначення динаміки зміни непрямих показників процесу спікання та моделей об'єктів керування, які ґрунтуються на базі авторегресійних структур з регуляризацією, що забезпечує надійне функціонування системи керування в умовах дії значних параметричних та координатних збурень при дотриманні обмежень, встановлених регламентами на проведення технологічних процесів і роботою технологічних агрегатів. В роботі вирішено ряд наукових завдань, що забезпечують створення науково-

методичної, алгоритмічної і програмно-технічної баз автоматизації виробничих комплексів із застосуванням інформаційних технологій.

У дисертаційній роботі актуальність сформульованої наукової проблеми підтверджується шляхом реалізації принципів адаптивного керування агломераційним виробництвом, що є складним технологічним процесом через відсутність адекватних математичних моделей і наявність ряду неконтрольованих збурень (зміни вологості, гранулометричного, фракційного і хімічного складу вхідної сировини тощо), а також відсутність оперативних методів хіміко-мінералогічного аналізу вхідної шихти і готового агломерату.

Ключові слова: автоматизація, регресія, нейроморфна структура, технологічний процес, критерій якості, гірничо-збагачувальні підприємства.

АННОТАЦИЯ

Щекин В. П. Адаптивное управление агломерационным комплексом на основе авторегрессионных структур с регуляризацией. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Криворожский национальный университет, Кривой Рог, 2012.

В диссертационной работе решена актуальная научная проблема, которая заключается в совершенствовании принципов адаптивного управления агломерационным комплексом на основе: развития подходов к синтезу систем определения динамического состояния нелинейных нестационарных процессов в условиях отсутствия математических моделей объектов в аналитическом виде, на основе метода формализации технологических ситуаций и идентификации параметров моделей объектов управления агломерационного комплекса; развития методологии моделирования объектов управления, которая основана на авторегрессионных структурах с регуляризацией; разработки адаптивных алгоритмов управления технологическими процессами агломерационного комплекса; разработки метода спецификации нейроморфных эмуляторов прямой и обратной динамики объектов управления основанных на авторегрессионных структурах при отсутствии их моделей в аналитическом виде; реализации адекватного определения структурно-параметрических особенностей регуляторов локальных систем автоматического управления параметрами процессов агломерационного комплекса; учета состояния технологических подсистем и динамики изменения непрямых параметров процесса спекания агломерата в процессе управления, на основе развития подхода связанного с определением коррекции уставок регуляторов локальных САР параметров процессов аглопроизводства; разработанного метода адаптивного управления технологическим процессом спекания агломерата с параметрической адаптацией локальных регуляторов, что

обеспечивает согласованную работу технологических агрегатов отделения спекания, а также компенсацию неконтролируемых возмущений и, как следствие, позволяет гарантировать надежное функционирование системы управления агломерационным комплексом в условиях действия существенных параметрических и координатных возмущений, что приводит к повышению конкурентоспособности агломерационного производства.

Агломерационное производство относят к сложным технологическим процессам ввиду отсутствия адекватных математических моделей и наличия ряда неконтролируемых возмущений (изменения влажности, гранулометрического, фракционного и химического состава входного сырья, и т.п.), а также отсутствия оперативных методов химико-минералогического анализа входной шихты и готового агломерата. Агломерационный процесс рассматривается в работе как взаимосвязанная технологическая система, которая находится под воздействием случайных возмущений, и в данном случае, при разработке концепции синтеза адаптивной САУТП, решается задача обеспечения устойчивости системы и минимизации целевой функции.

Основные результаты которые выносятся на защиту, направлены на разработку адаптивных систем автоматического управления технологическими процессами агломерационного комплекса с применением разработанных концепций параметрического и структурного синтеза нейронечетких систем определения динамического состояния объектов управления и авторегрессионных структур с регуляризацией (ARMABIS-структур), которые характеризуются асимптотической устойчивостью и адаптивными свойствами, полученными за счет настройки весовых коэффициентов регрессионного лага на базе модифицированного градиентного метода минимизации квадратичного функционала, а условие устойчивости обеспечивается настройкой весовых коэффициентов критерияльного лага.

Разработанные в диссертационной работе методы, средства и подходы к синтезу и анализу адаптивных систем автоматического управления технологическими процессами проверены на объектах: ОАО «Марганецкий горно-обогатительный комбинат» - разветвленные конвейерные линии шахт и рудников; ОАО «Криворожский железорудный комбинат» – ТП разгрузки шахтных вагонеток, разветвленные конвейерные линии шахт и рудников, ТП добычи и транспортировки (внедрение АСУТП обеспечивает уменьшение объемов непроизводственных расходов на 10-13% от общего объема); ОАО «Южный горно-обогатительный комбинат» - ТП спекания агломерата в условиях АФ№1 с годовым объемом производительности по агломерату 2,4 млн.т. (внедрение адаптивной АСУТП обеспечивает получение ожидаемого годового экономического эффекта 796381,6 грн.); ОАО «Северный горно-обогатительный комбинат» - внедрение систем определения корректирующих уставок локальных систем нижнего уровня управления ТП и нейронечеткого планирования графиков проведения планово-предупредительных ремонтов позволяет снизить затраты на электроэнергию

в среднем на 0,5-1%; ОАО «Сухая Балка» - поточно-транспортный комплекс (внедрение системы позволило повысить производительность на 5% и качество продукции на 3%, а также снижены энергозатраты на 6%); ОАО «Ареслор Миттал Кривой Рог» - агломерационный комплекс ГОКа (внедрение разработанной адаптивной АСУТП спекания агломерата позволило обеспечить заданные качественные показатели готового продукта и повысить среднесуточную производительность агломерационного комплекса на 0,91%) что является практическим свидетельством их реализации в условиях управления объектами с немоделируемой динамикой.

Ключевые слова: автоматизация, регрессия, нейроморфная структура, технологический процесс, критерий качества, горно-обогатительные предприятия.

ANNOTATION

Shchokin V. P. Adaptive control agglomeration complex on the basis of autoregressive structures with regulation. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.13.07 - automation of control processes. – Krivoy Rog national university, Krivoy Rog, 2012.

The dissertation is devoted perfection of principles of adaptive management sintering process with application of methods and means of the dynamic condition analysis of technological processes. Methods and means realized by means of dynamics change definition of sintering process indirect indicators and objects model of management which are based on autoregressive model with regularization. It provides reliable a control system functioning in the conditions of considerable parametrical and coordinate indignations actions at observance of technological processes parameters and technological units works restrictions. In work a number of scientific tasks which provide scientifically methodical, algorithmic and program-technological base creation of industrial processes automation with information technology application is solved.

In the dissertation the urgency of the formulated scientific problem proves to be true by realization of sintering manufacture adaptive management principles. Manufacture is difficult technological process in the absence of adequate mathematical model and some uncontrollable indignations presence (humidity change, raw materials granulometric, fractional and a chemical compound, etc.), and absence of operative methods of the chemical and mineralogical analysis entrance material and ready agglomerate.

Keywords: automation, regression, neuromorphous structure, technological process, quality criterion, ore mining and processing enterprises.

Вадим Петрович Щокін

**Адаптивне керування агрегаційним комплексом
на основі авторегресійних структур з регуляризацією**

Авторефератдисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Підписано до друку 10.02.2012.

Формат 60×84/16. Ум.-друк. арк. – 2,5. Авт. арк. – 1,9.

Тираж 100 пр.

Друкарня СПД Щербенок С. Г.

Свідоцтво ДП 126-р від 12.10.2004.

вул. Рокоссовського, 5/3, м. Кривий Ріг, 50027.

(0564) 92-20-77.