

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

ПРИХОДЧЕНКО СЕРГІЙ ДМИТРОВИЧ



УДК 681.5.037.5:[622.753:004.032.26]

**БАГАТОКРИТЕРІЙНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ СТАНУ ТА КЕРУВАННЯ
ГІДРОТРАНСПОРТОМ ЗБАГАЧУВАЛЬНОЇ ФАБРИКИ НА ОСНОВІ
НЕЙРОПОДІБНОЇ СТРУКТУРИ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кривий Ріг – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (м. Дніпро).

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Мещеряков Леонід Іванович,

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (м. Дніпро),
професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Кондратець Василь Олександрович,

Центральноукраїнський національний технічний університет
Міністерства освіти і науки України (м. Кропивницький),
професор кафедри автоматизації виробничих процесів;

доктор технічних наук, професор

Головко В'ячеслав Ілліч,

Національна металургійна академія України
Міністерства освіти і науки України (м. Дніпро),
професор кафедри автоматизації виробничих процесів.

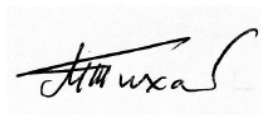
Захист відбудеться «16» травня 2019 року об 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 09.052.03 у ДВНЗ «Криворізький національний університет» за адресою: 50027, м. Кривий Ріг, вул. В. Матусевича, 11, ауд. 345.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ДВНЗ «Криворізький національний університет» за адресою: 50002, м. Кривий Ріг, вул. Пушкіна, 37.

Автореферат розісланий « 11 » квітня 2019 року.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



М.П. Тиханський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний стан постійного здорожчання цін на енергоносії вимагає зниження енерговитрат на виробництві. Виконання цього завдання можливе лише за умови впровадження на підприємствах нових більш економічних агрегатів чи вдосконалення наявних систем діагностики та керування технологічними процесами в гірничо-металургійній галузі, частка якої в Україні становить близько 22 % від усього обсягу електроенергії, споживаної в країні. Водночас від 30 до 40 % собівартості переробки мінеральної сировини належать системам транспортування.

У працях низки авторів: А.А. Азаряна, Б.О. Блюсса, В.О. Бреннера, В.А. Воронова, Н.В. Глухової, В.І. Головка, М.І. Горбійчука, Ю.Г. Качана, Є.В. Кочури, А.І. Купіна, О.Н. Марюти, В.С. Моркуна, Л.І. Мещерякова, О.В. Садового, Є.В. Семененка, Б.М. Халимбекова, Halim E.B., Hrbček J., Wachel J.C. та ін. – було розроблено системи та методи ідентифікації й контролю параметрів агрегатів гірничо-збагачувальних комплексів. Утім, зазначені наукові дослідження лише частково враховують питання, пов'язані з інтелектуальною підтримкою прийняття рішень в умовах невизначеності на збагачувальних фабриках, що зумовлює появу нових напрямів дослідження.

Процес гідротранспортування шламів на збагачувальному підприємстві є дуже складним і характеризується неконтрольованими параметрами та збурювальними діями. Водночас, будь-яке втручання в геометрію системи гідротранспорту викликає зміни в русі пульпових мас, що суттєво впливає на навантаження системи гідротранспортування. Нагляд за станом гідротранспортної системи (ГТС) на сьогодні здійснюється оператором, який, спираючись на отриману з контрольних приладів інформацію в процесі гідротранспортування, приймає управлінське рішення. Зважаючи на великий обсяг отриманої первинної інформації, операторові складно комплексно оцінити поточну ситуацію, що впливає на своєчасне прийняття управлінських рішень. Особливо критичними щодо цього є передаварійні й аварійні стани вузлів системи гідротранспорту.

Тому актуальним є наукове завдання визначення залежності частот спектру споживаної миттєвої активної потужності (СМАП) електродвигуна шламового насоса від густини пульпи та положення заслінки в умовах невизначеності процесу гідротранспортування, та прийняття рішень за допомогою системи моделей гідротранспорту збагачувальної фабрики, що зумовлене об'єктивною потребою комплексного вивчення питання підвищення точності керування й достовірності ідентифікації стану системи гідротранспорту під час роботи технологічного устаткування в передаварійних і аварійних режимах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до напряму науково-дослідних держбюджетних тем «Інтелектуальні технології управління процесами гірничого виробництва в задачах енергозбереження і енергоефективності» (№ ДР 0113U000402, 2014–2015 рр.) та «Енергозберігаюче управління електромеханічними технологічними комплексами і системами гірничо-металургійної промисловості» (№ ДР 0115U002296, 2015–2017 рр.).

Мета й завдання дослідження.

Мета дисертаційної роботи полягає в розробленні моделей та вдосконаленні методів, спрямованих на підвищення ефективності ідентифікації стану та керування устаткуванням гідротранспорту на гірничо-збагачувальних комбінатах за рахунок багатокритерійної ідентифікації об'єкта й підтримки прийняття управлінських рішень у профілактичному обслуговуванні та під час ремонту, що збільшує продуктивність роботи устаткування й скорочує витрати на його обслуговування. Досягнення поставленої мети здійснюється розв'язанням основних завдань:

- комплексний аналіз та узагальнення наявних методів і систем ідентифікації стану та керування гідротранспортом гірничо-збагачувальних підприємств залежно від густини шламу, що надходить у насос; визначення основних напрямків їх розвитку та вдосконалення;
- розроблення динамічних математичних моделей гідротранспортування та системи керування гідротранспортною мережею збагачувального підприємства з урахуванням ступеня зносу в процесі функціонування їх складників;
- проведення експериментальних досліджень роботи гідротранспортної системи збагачувальної фабрики, обґрунтування запропонованих моделей; здійснення порівняльного аналізу отриманих результатів;
- подальший розвиток методів ідентифікації стану систем гідротранспорту з урахуванням методів штучного інтелекту й отриманих теоретичних та експериментальних даних;
- розроблення принципів керування системами гідротранспорту в умовах часткової невизначеності та неповноти отриманої інформації за сформованими критеріями оцінювання якості їхнього функціонування.

Об'єкт дослідження – процес керування гідротранспортом на збагачувальній фабриці, що відбувається за умов невизначеності параметрів об'єкта.

Предмет дослідження – модель гідротранспортної системи з комплексною ідентифікацією станів системи гідротранспорту для збагачувальних фабрик, зокрема контролем густини пульпи, положенням заслінки та спектрами споживаної активної потужності привідного електродвигуна шламового насоса (ШН).

Методи досліджень. В основу виконаних досліджень покладено систематизацію сучасних підходів і методів автоматизації технологічних об'єктів для обґрунтування актуальності, мети й завдань дослідження, фундаментальні положення теорії автоматичного керування; метод статистичного оброблення експертної інформації, методи кореляційного та спектрального аналізу, математичного й комп'ютерного моделювання, універсальних і спеціалізованих нейромережових парадигм, метод моделі прогнозного контролю та метод теоретико-множинного підходу.

Ідея роботи полягає в оперативному оцінюванні стану процесу гідротранспортування та попередженні розвитку передаварійних і аварійних ситуацій у системах гідротранспорту гірничо-збагачувальних підприємств шляхом контролю його стану як методами розпізнавання, так і методами штучного інтелекту та створення системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності на основі нейроподібної структури, за рахунок чого знижується час

простоїв і підвищується продуктивність роботи гідротранспортної системи.

Наукова новизна отриманих результатів.

Наукові положення, що виносяться на захист:

1. Залежність амплітуди інфранизьких частот у діапазоні від 0 до 3,0 Гц спектра споживаної миттєвої активної потужності привідного електродвигуна шламового насоса прямо пропорційна густині пульпи, що дає змогу підвищити достовірність процесу ідентифікації останнього параметра, ураховуючи нестационарну турбулентність потоку в ГТС і зумовлені нею похибки відомих методів вимірювання густини пульпи.

2. Амплітудний рівень інтервальних частот 32, 38, 44, 125 Гц спектра споживаної миттєвої активної потужності привідного електродвигуна шламового насоса є залежним від ступеня відкриття заслінки, що дозволяє підвищити точність ідентифікації стану системи гідротранспорту під час роботи технологічного устаткування в передаварійних і аварійних режимах.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Уперше представлено ситуаційну модель технологічного процесу гідротранспортування рудної пульпи на збагачувальній фабриці, розроблену з урахуванням теоретико-множинного підходу для прискорення прийняття управлінських рішень в умовах інформаційної невизначеності.

2. Удосконалено математичну модель, що підвищує ефективність контролю за станом та керованістю об'єкта на основі багатомасової системи роторів Джеффкотта-Лавалю, яка дає змогу ідентифікувати спектр відмов ГТС, ураховуючи зношування елементів конструкції, що сприяє її динамічній адаптації до змін параметрів системи в результаті некритичного зношування устаткування на відміну від раніше застосованих методів ідентифікації систем гідротранспорту.

3. Уперше виявлено закономірність зміни частот споживаної миттєвої активної потужності (СМАП) електродвигуна від густини пульпи, яка транспортується, а також положення заслінки, що адаптована в інтелектуальну систему ідентифікації станів і керування ГТС. Це дає змогу підвищити ефективність контролю даних параметрів і керування процесом гідротранспортування.

4. Розроблено самонавчальну нейроподібну систему для багатокритерійної ідентифікації станів і керування процесом внутрішньофабричного гідротранспортування рудної пульпи на збагачувальній фабриці, що включає методи ідентифікації та критерії оцінювання самонавчання для кожного з методів, яка дозволила підвищити значення розробленого критерію ухвалення правильних рішень щодо раніше відомих методів.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено методичне, технічне та програмне забезпечення для реалізації методу контролю за даними споживаної миттєвої активної потужності привідного електродвигуна шламового насоса для аналізу технічного й технологічного стану систем гідротранспорту в процесі експлуатації.

2. Запропоновано методику розроблення системи підтримки ухвалення рішень для керування гідротранспортом на гірничих підприємствах і розроблене програмне забезпечення впроваджено в дослідницькі програми Інституту геотехнічної

механіки ім. М.С. Полякова НАН України.

3. Сформовано методику розроблення системи підтримки ухвалення рішень для керування гідротранспортом на гірничих підприємствах, яку передано для використання в навчальних і дослідницьких програмах до Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна й Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.

4. Рекомендації, які містять методи, запропоновані в даній роботі, є впровадженими на збагачувальній фабриці «Тандем Торг ТПК».

Обґрунтованість і вірогідність наукових положень, досліджень, висновків і рекомендацій підтверджується: коректним використанням математичного апарату; великим обсягом дослідних даних, отриманих у реальних режимах роботи технологічних агрегатів; застосуванням сучасних методів експериментальних досліджень в умовах ПрАТ «Полтавський ГЗК»; експериментальним підтвердженням адекватності методів і моделей.

Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні наукових положень роботи, проведенні теоретичних і експериментальних досліджень, подальшому розробленні, уточненні відповідних рекомендацій, розширенні знань про процес автоматизації керування гідротранспортуванням на збагачувальній фабриці. Увесь виклад змісту наукової праці, усі положення, що захищаються, основні результати теоретичних і експериментальних досліджень автор отримав особисто.

У працях, написаних у співавторстві, дисертантові належать такі результати: [1] – проведено аналіз відмов гідротранспортних систем і виділено діагностичні параметри; [2] – запропоновано модель автоматизованої системи керування для гідротранспорту збагачувальної фабрики; [5] – здійснено аналіз і статистичне оброблення результатів ідентифікації стану гідротранспортної системи; [6] – синтезовано оптимальний регулятор; [7] – сформовано електромеханічну модель системи гідротранспорту; [8] – створено систему керування за передбачуваною моделлю; [10] – розроблено ситуаційну модель системи гідротранспорту; [14] – розроблено електромеханічну модель системи гідротранспорту вуглевідходів; [21] – проаналізовано наявні системи та запропоновано критерії для їхнього оцінювання.

Апробація результатів дисертації. Апробація положень і результатів, представлених у дисертаційній роботі, здійснювалася на конференції молодих учених «Геотехнічні проблеми розробки родовищ» (Дніпропетровськ, 2004 р., 2008 р.), Міжнародній конференції «Міжнародний форум гірників – 2009» (Москва, 2009 р.); Всеукраїнській конференції «Інформаційні технології в освіті, техніці і промисловості» (Івано-Франківськ, 2013 р.), Міжнародній конференції «Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості» (Дніпро, 2011 р., 2017 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в 24 працях, зокрема: 11 статей – у наукових фахових виданнях України, із яких 1 – у виданні, включеному до міжнародної наукометричної бази, 2 – у наукових періодичних закордонних виданнях, 3 – у збірниках наукових праць і матеріалах конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел, додатків.

Загальний обсяг друкованого тексту становить 243 сторінки, із них 110 сторінок основного тексту, 68 рисунків, 13 таблиць, список використаних джерел містить 153 найменування на 16 сторінках, та 11 додатків на 79 сторінках.

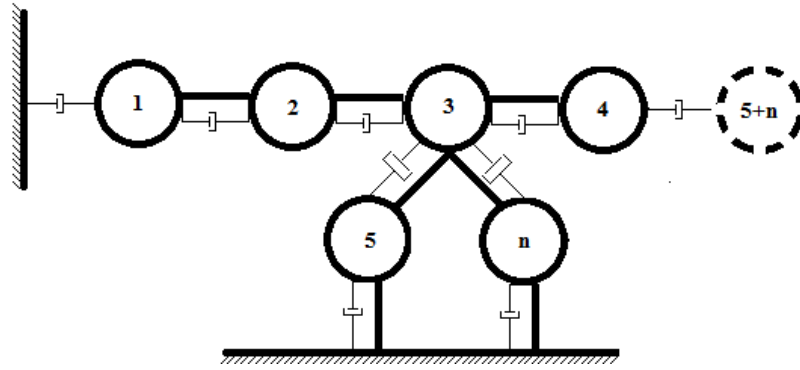
ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету й завдання наукового дослідження, визначено наукову новизну, теоретичну й практичну цінність та реалізацію отриманих результатів роботи.

У **першому розділі** дисертації проаналізовано відомі моделі й визначено закономірності керування процесом гідротранспортування, обґрунтовано методи й визначено роль систем керування гідротранспортними мережами. Типова гідротранспортна система складається з приймальних і напірних резервуарів, які містять необхідну конструктивну арматуру, трубопроводи, шламовий насос, електродвигун, системи вимірювальних приладів та пристрої, необхідні для заповнення насосів рідиною перед пуском. Проаналізовані моделі гідротранспортних систем засвідчили, що основною в трубопровідній системі виступає залежність «Тиск-Подача», яку оптимально стабілізовано в робочій точці. Із урахуванням особливостей об'єкта керування, обґрунтовано методи контролю за системами гідротранспорту, визначено їх емпіричну природу, простежено за роботою наявних моделей гідротранспортних систем, які не враховують зношування устаткування в процесі експлуатації. Вищевказані недоліки систем контролю станів та систем керування гідротранспорту збагачувальних фабрик призводять до необхідності побудови моделі системи гідротранспорту, яка враховує зношення елементів та дозволяє внесення змін до моделі, при задовільних станах роботи, а також системі підтримки керівних рішень, що базуються на цій моделі. На підставі проведеного аналізу сформульовано мету й завдання дослідження.

У **другому розділі** дисертації визначено теоретичні засади процесів формування сигналів, що характеризують стан системи гідротранспорту. Відокремлено найбільш перспективний метод для моделювання об'єкта керування за допомогою операторної форми ланцюгових дробів, що уможлиблює відстеження несталоного руху пульпи, облік зношування системи гідротранспорту, а також дає можливості підлаштування моделі до експлуатаційних станів агрегату шляхом зміни та перерахунку ланок рівняння.

Результати досліджень сучасних шламових насосів дають змогу скласти схему взаємодії його складових частин, які рухаються. На рис. 1 представлено динамічну модель такої взаємодії, прийняту як базову.



1 – електродвигун ШН; 2 – муфта; 3 – вал; 4 – робоче колесо; 5...n – ролики підшипників; 5+n – пульпа; n – загальна кількість роликів у підшипниках вала

Рис. 1. Схема динамічної моделі шламового насоса

Відповідна математична модель системи гідротранспорту виражається такими рівняннями:

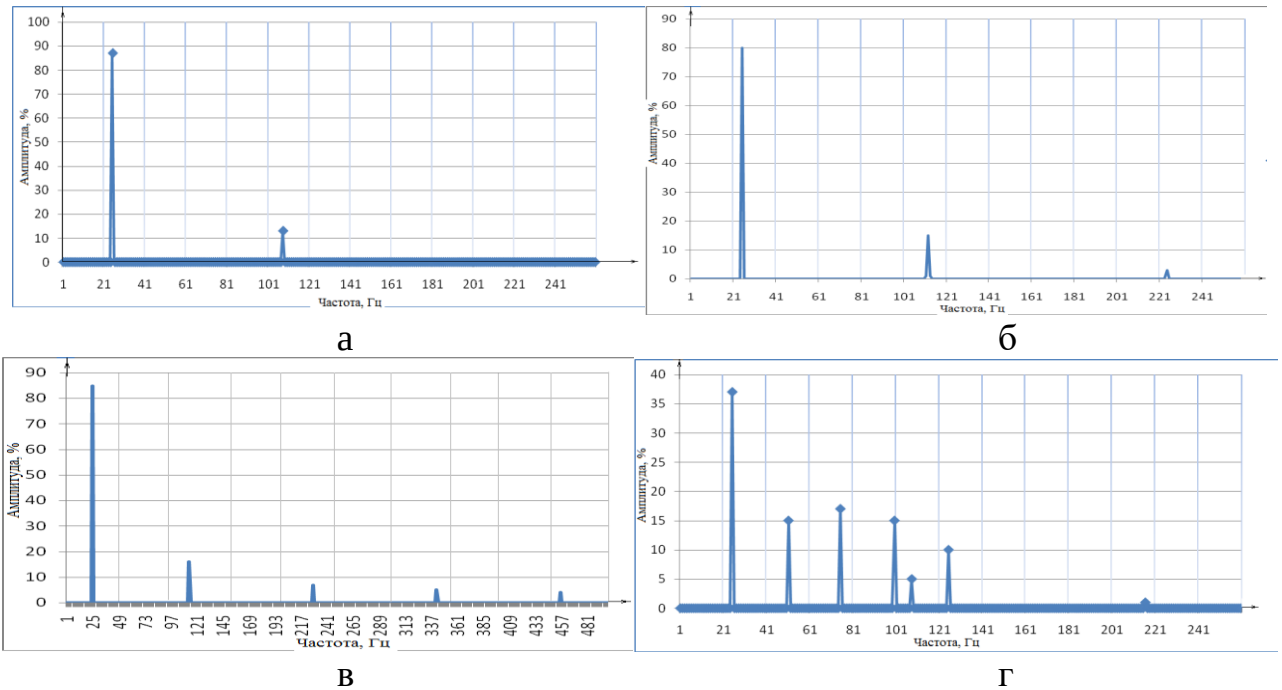
$$\begin{aligned}
 P_1(s) &= B_{0,1}(s) \cdot B_1(s); \\
 P_2(s) &= B_{0,1}(s) \cdot B_1(s) \cdot B_{1,2}(s) \cdot B_2(s); \\
 P_3(s) &= B_{0,1}(s) \cdot B_1(s) \cdot B_{1,2}(s) \cdot B_2(s) \cdot B_{2,3}(s) \cdot B_3(s); \\
 P_4(s) &= B_{0,1}(s) \cdot B_1(s) \cdot B_{1,2}(s) \cdot B_2(s) \cdot B_{2,3}(s) \cdot B_3(s) \cdot B_{3,4}(s) \cdot B_4(s); \\
 P_5(s) &= B_{0,1}(s) \cdot B_1(s) \cdot B_{1,2}(s) \cdot B_2(s) \cdot B_{2,3}(s) \cdot B_3(s) \cdot B_{3,4}(s) \cdot B_4(s) \cdot B_{4,5}(s) \cdot B_5(s),
 \end{aligned} \tag{1}$$

де P_i – передавальні функції, а B_i – вхідні функції i -х елементів динамічної моделі електромеханічної системи шламового насоса. Амплітудно-частотну характеристику динамічної моделі системи ГТС, представлену на рис. 2, отримано внаслідок проведеного розрахунку математичної моделі з урахуванням заданих параметрів.

Розраховані нормовані спектральні щільності з динамічної моделі шламового насоса відповідно до заданих параметрів представлено на рис. 2. Установлено, що два основні піки – 25 і 108 Гц – передбачені, так як: 25 Гц – частота обертання вала електродвигуна й основних конструктивних елементів; 108 Гц – частота обертання роликів опорних підшипників вала шламового насоса. У разі введення в модель параметрів елементів, що імітують зношування роликів підшипника (зменшення його діаметра на 2 %), амплітудний рівень спектральних характеристик відповідно змінюється (рис. 2). Частота обертання роликів підшипників збільшується на 2–3 %, водночас з'являється додаткова частота вібрації, тотожна подвоєній частоті вібрації підшипників. Також при імітації більшого зносу роликів підшипника (зменшення його діаметра на 6 %) з'являється низка пікових збурень на частотах, які кратні частоті обертання роликів. При додаванні ступеня свободи до опори (імітація послаблення кріплення) у спектрі виникають збурення на частотах, які кратні частоті обертання електродвигуна шламового насоса (рис. 2).

Для підвищення достовірності результатів моделювання додатково застосовано концепцію подання ШН, що має форму системи роторів Джеффкотта-Лавала. Уважається, що кожний рухомий складовий конструктивний елемент

представлено у формі ротора Джеффкотта-Лаваля, який сполучений із суміжними елементами пружним з'єднанням.



а – без зношування складових елементів; б – з імітацією зношування опорних підшипників; в – імітація сильного зношування опорних підшипників; г – імітація послаблення кріплення

Рис. 2. Нормована спектральна щільність крутного моменту вала моделі ШН

Передавальна функція такої системи є виразом (2)

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)}, \quad (2)$$

де

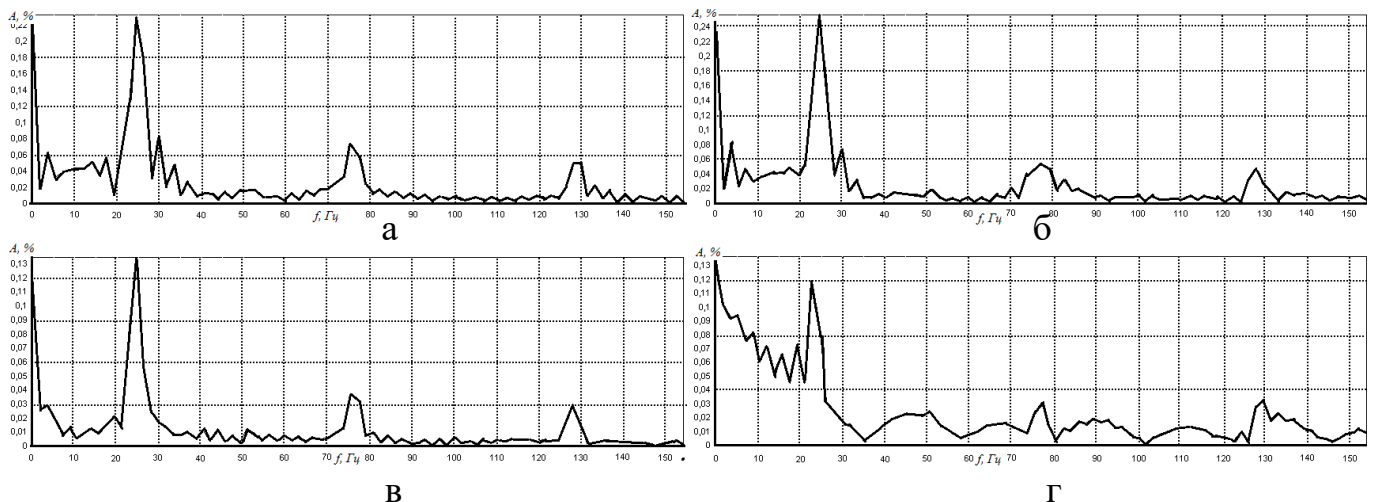
$$\begin{aligned} N(s) &= 6,1 \cdot 10^{10} s^6 + 1,7 \cdot 10^{12} s^5 + 1,1 \cdot 10^{17} s^4 + 2,1 \cdot 10^{18} s^3 + 6,91 \cdot 10^{22} s^2 + \\ &+ 6,5 \cdot 10^{23} s + 1,4 \cdot 10^{28}; \\ D(s) &= s^{10} + 47,12 s^9 + 2,5 \cdot 10^6 s^8 + 9,4 \cdot 10^7 s^7 + 2,3 \cdot 10^{12} s^6 + 6,6 \cdot 10^{13} s^5 + \\ &+ 9,9 \cdot 10^{17} s^4 + 1,9 \cdot 10^{19} s^3 + 1,7 \cdot 10^{23} s^2 + 1,6 \cdot 10^{24} s + 3,6 \cdot 10^{27}. \end{aligned}$$

Після проведеного комплексного аналізу відмов та нештатних станів, що виникають у ГТС, розроблено схему причинно-наслідкових зв'язків аварійних станів, відмов та їх ознак. Сформовано та проаналізовано зведену таблицю зі списком елементів і відмов для кожного з них, переліком ознак, що супроводжують кожну відмову, методи діагностики та ремонту.

Здійснений функціональний аналіз показав вплив різних параметрів на стан системи загалом. З'ясовано залежність між спектральним контролем споживаної

миттєвої потужності та загальним станом агрегату, для якої R^2 складає від 0,89 до 0,915. Разом такі параметри, як миттєва потужність, положення заслінки, густина пульпи при відомих технічних параметрах трубопровідної системи, складають залежність, у якій R^2 складає 0,97–0,983, що дає змогу застосувати їх для повноцінного контролю та ідентифікації внутрішньофабричної гідротранспортної системи. Отже, у результаті проведених наукових досліджень сформовано діагностичні ознаки станів системи гідротранспортування, які використано для побудови одного з модулів, що проводить аналіз стану в розробленому методі автоматичного діагностування.

Третій розділ дисертації присвячено результатам експериментальних досліджень, що підтверджують отримані теоретичні закономірності формування спектральних характеристик миттєвої споживаної потужності привідного електродвигуна ШН. Проведені в умовах другої збагачувальної фабрики ПрАТ «Полтавський ГЗК» експериментальні дослідження засвідчили збіжність теоретичної моделі та практично отриманих результатів. Окрім того, було визначено необхідність введення в модель додаткової передавальної ланки, що відповідає за коливання трубопроводу та враховує його положення, викликане нерівномірністю протікання пульпи в трубопроводі. На рис. 3 представлено експериментальні спектральні характеристики миттєвої споживаної потужності електродвигуна ШН 5-ГРк8 в різних режимах роботи. Комплексний аналіз експериментальних спектральних характеристик підтверджує достовірність отриманих теоретичних закономірностей формування вихідних сигналів системи гідротранспорту, а саме: зсув відповідних піків спектру під час зношування устаткування порівняно зі спектральними характеристиками нового устаткування.



а – нормальна робота (заслінка відчинена на 100%, щільність пульпи – 1,38 кг/дм³);
 б – нормальна робота (заслінка відчинена на 100%, щільність пульпи – 1,40 кг/дм³);
 в – аварійна ситуація (тимчасова зупинка колеса); г – аварійна ситуація (аварійне відключення двигуна)

Рис. 3. Спектри споживаної миттєвої активної потужності електродвигуна шламового насоса 5-ГРк8 у різних режимах роботи

Найбільш показові залежності наведено на рис. 4. Це – співвідношення амплітуди частот у діапазоні частот від 0 до 3 Гц із показником щільності пульпи та залежність амплітуди частот спектра СМАП 32, 35 та 125 Гц із показником відкриття заслінки системи гідротранспорту секції флотації збагачувальної фабрики, де проводились експериментальні дослідження. Отже, теоретичними й експериментальними дослідженнями встановлено закономірності формування енергетичних сигналів системи гідротранспорту, які можуть бути використані для оцінювання поточного прогнозу подальшого стану системи гідротранспортування.

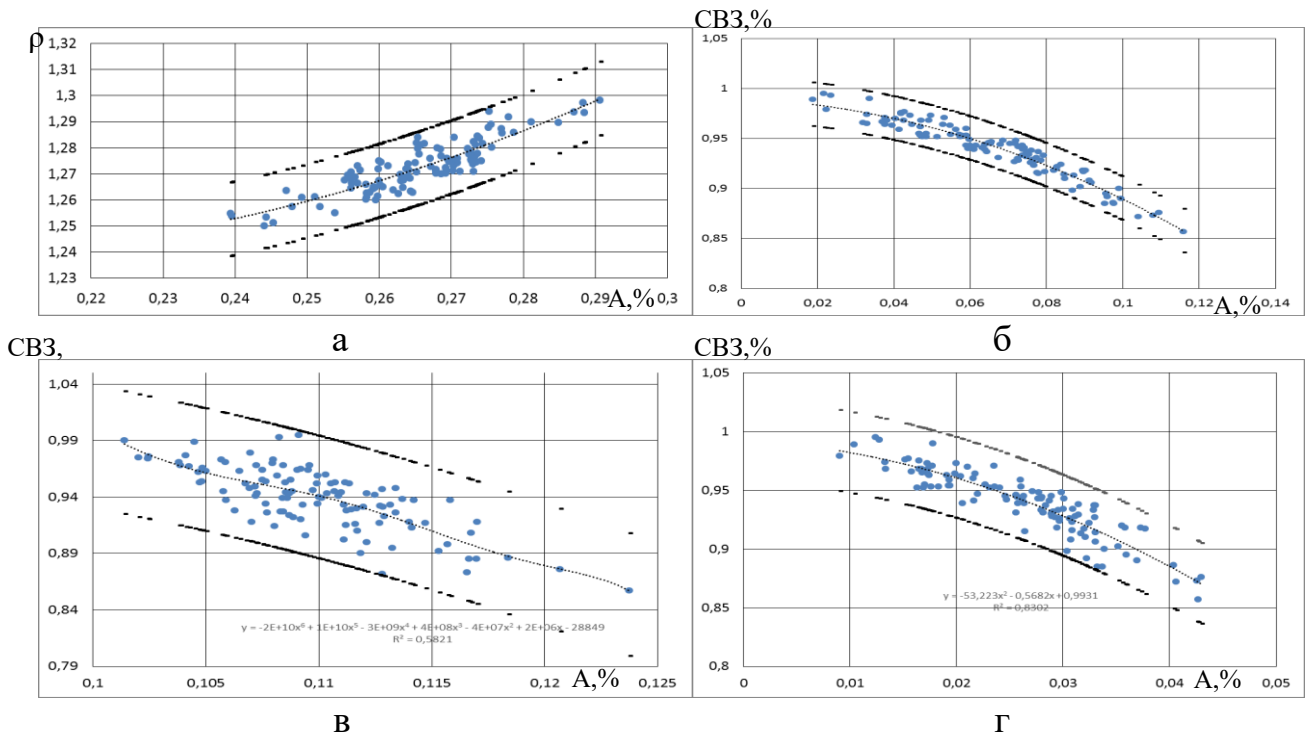


Рис. 4. Відношення спектральної амплітуди частот спектра СМАП до щільності пульпи (а) та до ступеня відкриття заслінки (б–г)

Для залежності амплітуди інфранизких частот від щільності пульпи розподілення найкраще описується формулою (3), для якої коефіцієнт детермінації R^2 складає 0,938. Для добутку амплітуд складових спектра СМАП на частотах 32, 35, 45 та 125 Гц розподілення найкраще описується формулою (4), для якої коефіцієнт детермінації R^2 складає 0,901.

$$y = 5,922x^2 - 2,2382x + 1,449, \quad (3)$$

$$y = -889\,769,095x^6 + 4\,937\,533,465x^5 - 11\,408\,284,745x^4 + 14\,048\,091,078x^3 - 9\,723\,532,486x^2 + 3\,586\,875,053x - 550\,913,273. \quad (4)$$

У четвертому розділі дисертації розроблено метод автоматичного контролю за станом системи гідротранспорту, здійснений з урахуванням проведеного аналізу спектральних характеристик миттєвої потужності електродвигуна ШН.

Запропоновано таку структуру АСК процесом гідротранспортування: насос приводиться в рух приводом, перед яким установлений контролер із прогнозуючою моделлю (КПМ). Зворотний зв'язок від насоса надходить на вхід контролера. Також ураховуються збурення моделі та збурення ШН. Проаналізовані результати моделювання засвідчили стабільність роботи системи без входу в резонанс. Окрім того, амплітуда коливань автоматичної системи на 20 % менша від тієї, що простежується під час регулювання ПІД-регулятором.

Діагностичний аналіз поточного стану гідротранспортної системи здійснено на підставі теоретико-множинного підходу, що дозволяє аналізувати множину інформаційних повідомлень та об'єкта керування з огляду на їх кількісні показники. Пошук якісного аспекту інформації зумовлений декомпозицією, вивченням, дослідженням характеристик множинних повідомлень із урахуванням якісних моментів їхніх складників. Поточна ситуація, що виникла в момент часу τ , описується теоретико-множинним способом як (5)

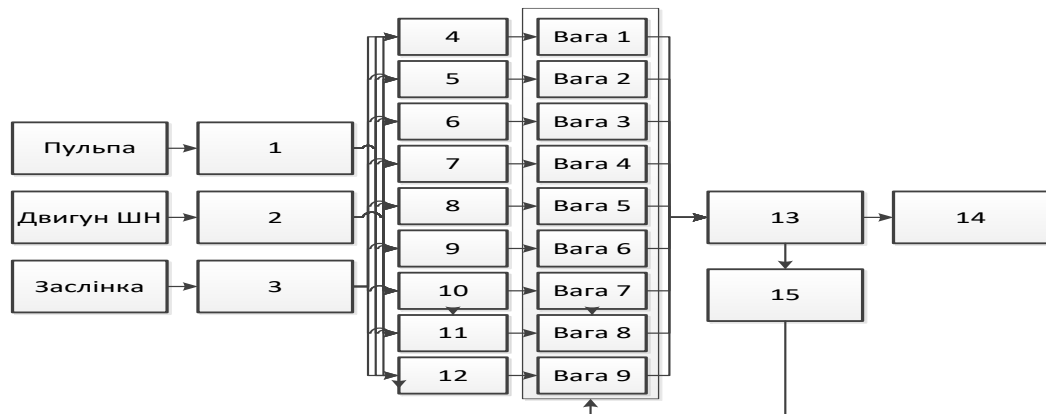
$$D_\tau = \{P_\tau, Zs_\tau, PS_\tau, Op_\tau, Mon_\tau, HS_\tau\} \quad (5)$$

де Op_τ – дії оператора в даний момент часу; Mon_τ – стан системи моніторингу ГТС у даний момент часу; HS_τ – стан елементів системи гідротранспортування. Тоді в ситуації «Прогин вала» вводяться такі умовні позначення: b_1^{HS} – прогин вала; b_2^{HS} – підвищена вібрація агрегату; b_3^{HS} – перегрівання підшипників; b_4^{HS} – недостатній тиск; b_5^{HS} – зачіпання рухомими елементами нерухомих; b_6^{HS} – вихід підшипників із ладу; b_7^{Mon} – збільшення амплітуди спектральної складової СМАП електродвигуна насоса на частоті обертання вала; b_8^{Mon} – збільшення амплітуди спектральних складових СМАП електродвигуна ШН на частотах, кратних частоті обертання вала; b_9^{Mon} – перевищення гранично допустимої амплітуди спектральної складової СМАП електродвигуна ШН на частоті обертання вала; b_{10}^{Mon} – перевищення гранично допустимої амплітуди спектральних складових СМАП електродвигуна ШН на частотах, кратних частоті обертання вала; b_{11}^{Op} – відключення системи; b_{12}^{Op} – продовження функціонування системи до кінця зміни. Цей процес у термінах мови ситуаційного керування записується як (6)

$$\begin{aligned} B_{ns} = & (b_1^{HS} r_6 b_2^{HS}) \cup (b_1^{HS} r_6 b_3^{HS}) \cup (b_2^{HS} r_6 b_4^{HS}) \cup (b_2^{HS} r_6 b_5^{HS}) \cup (b_3^{HS} r_6 b_6^{HS}) \cup \\ & \cup (b_3^{HS} r_6 b_8^{Mon}) \cup (b_3^{HS} r_6 b_{10}^{Mon}) \cup (b_2^{HS} r_6 b_7^{Mon}) \cup (b_2^{HS} r_6 b_9^{Mon}) \cup (b_8^{Mon} r_6 b_{12}^{Op}) \cup \\ & \cup (b_7^{Mon} r_6 b_{12}^{Op}) \cup (b_9^{Mon} r_6 b_{11}^{Op}) \cup (b_{10}^{Mon} r_6 b_{11}^{Op}). \end{aligned} \quad (6)$$

У випадку отримання неповної або часткової інформації як рішення має бути $k_t = \arg \min(B_{i,j})$, де $B_{i,j} = |F_i F_j|$, F_i – ознаки еталонної ситуації, F_j – ознаки поточної ситуації.

Для здійснення аналізу функціонального стану ГТС перспективним вважається підхід, згідно з яким для аналізу сигналів, що надходять, водночас задіяно як статистичні методи, так і методи штучного інтелекту. Для розв'язання цієї проблеми розроблено інформаційне та програмне забезпечення інтелектуальної підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності при керуванні гідротранспортом. Запропонований алгоритм відрізняється від раніше представлених схем для аналізу наявності саме паралельної роботи методів розпізнавання. Розроблена система функціонує з урахуванням методів розпізнавання й методів штучного інтелекту, із застосуванням прикладів, що сприяють структуруванню висновків і рекомендацій, спрямованих на дії людини-диспетчера. Структурну схему такої системи представлено на рис. 5.



1 – щільність пульпи; 2 – спектральні характеристики СМАП; 3 – датчик відкриття;
 4 – експертна система; 5 – нейронна мережа Хопфілда; 6 – багатошаровий персептрон; 7 – метод кластеризації; 8 – метод потенційних функцій; 9 – метод Левенштейна; 10 – метод найближчих сусідів; 11 – АСК на теоретико-множинному підході; 12 – АСК на КПМ; 13 – нейромережева структура; 14 – пропонуване інтелектуальне рішення з керування ГТС; 15 – алгоритм навчання

Рис. 5. Схема системи підтримки ухвалення рішень з нейроподібною структурою

Якщо водночас є множина керуючих рішень P_y і n методів розпізнавання, кожний з яких пропонує рішення $P_{yij} \in P_y$, то спільне рішення нейроподібної структури (НС) буде визначено як (7)

$$P'_y = \max \left(\sum_{i=1}^n k_i \right) P_{yij}, \quad (7)$$

де k_i – коефіцієнт довіри методу i , налаштованого в процесі навчання нейроподібної структури. Ухвалюється рішення, яке набрало найбільше сумарне значення довіри з тих, що запропоновані методами першої ланки.

Функціонально на першій ланці НС кожен із методів самостійно за власним критерієм оцінює поточний стан ГТС та видає власне керуюче рішення. Так метод Левенштейна використовує модифікований під потребу розпізнавання спектрів критерій подібності між еталонним та отриманим спектрами (8)

$$k_l = \min(D(S_1, S_2)) = \min(\min(D(i, j-1) + 1, D(i-1, j) + 1, D(i-1, j-1) + 1) + m(S_1[i], S_2[j])). \quad (8)$$

Своєю чергою, мережа Хопфілда оптимізована під розпізнавання піксельного подання спектрів у вигляді вхідного вектора, тобто на першому кроці використовуються $X(t) = S[i, j \times 100] = V_s[i \times 100 + j \times 100]$, а на подальших кроках $X(t+1) = F(WX(t))$. Після циклу роботи мережі Хопфілда оцінюють збіг вектора X з еталонними та приймається відповідне керуюче рішення методу з числа тих, які визначені в додатку Б дисертації.

Для методу потенційних функцій (щодо спектру СМАП)

$$a(u) = \arg \max_{y \in Y} \sum_{i=1}^m [x_{i,u} = y] w(i, u), \quad w(i, u) = y(x_u^{(i)}) K\left(\frac{\rho(u, x_u(i))}{h(x_u(i))}\right), \quad (9)$$

де $y(x_u^{(i)})$ – коефіцієнти ваги, виставлені за близькістю до центрів кластерів із методу кластеризації.

Експериментальна перевірка запропонованих критеріїв на множині модельних та експериментальних даних, отриманих із реального об'єкта, показала підвищення якості розпізнавання поточного стану ГТС, що підтверджується збільшенням точності, порівняно з методами, які застосовувалися на виробництві раніше.

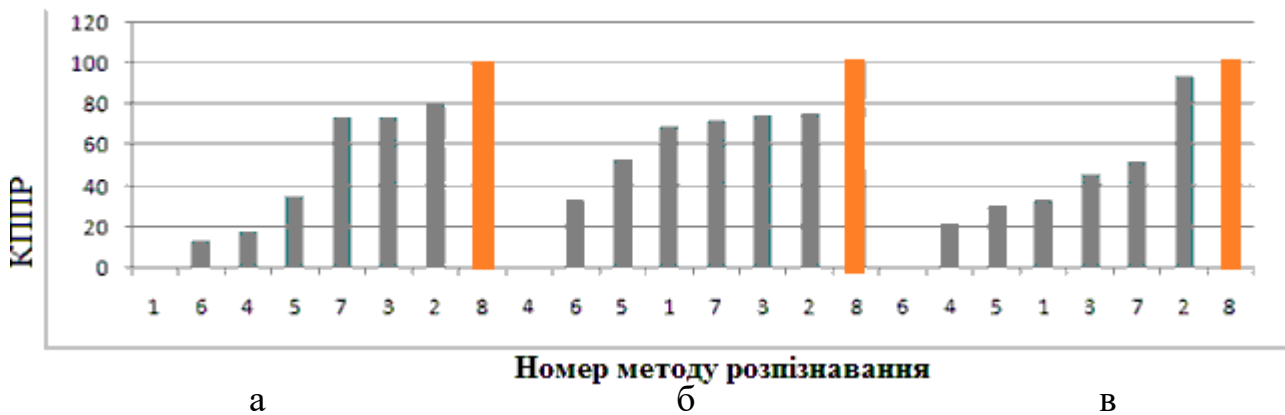
Особливо показовими є результати впровадження в роботу автоматизованої системи разом із запропонованими критеріями ухвалення рішень з метою розпізнавання стану ГТС, що знаходиться в зношеному стані: точність розпізнавання стає помітно вищою від раніше відомих методів.

Отже, розроблена автоматизована система здатна розпізнавати сигнали стану ГТС і надавати рекомендації щодо забезпечення інтелектуальної підтримки прийняття оперативних дій диспетчера, який контролює роботу системи внутрішньофабричного гідротранспорту в умовах невизначеності останньої.

Сформований у роботі критерій ухвалення правильних рішень визначається виразом (10) та описує співвідношення між множиною всіх рішень методу та множиною рішень, що призвели до безаварійної роботи протягом заданого проміжку часу

$$k_l = 1 - \frac{\sum (y_\tau - y_{\tau-1})}{\tau}, \quad (10)$$

де y_τ – поточний стан ГТС, $y_{\tau-t}$ – стан, що був передбачений t часу тому, τ – загальна кількість рішень методу. Проведене дослідження станів ГТС, параметри яких було висунуто різним методам для розпізнавання, показало, що нейроподібна структура, уживана для узагальнення результатів, отриманих різними методами, дає більшу точність порівняно з кожним із методів, які беруть участь у прийнятті остаточного рішення (рис. 6).



а – нормальний режим роботи; б – передаварійна ситуація; в – аварійна ситуація;
 1 – мережа Хопфілда; 2 – багатошаровий персептрон; 3 – експертна система;
 4 – метод кластеризації; 5 – метод потенційних функцій; 6 – метод Левенштейна;
 7 – метод k найближчих сусідів; 8 – нейроподібна структура.

Рис. 6. Нормований коефіцієнт ухвалення правильних рішень за станом ГТС різними методами з урахуванням зносу устаткування на експериментальних даних

Рекомендації разом із запропонованими методами впроваджено в роботу збагачувальної фабрики «Тандем Торг ТПК». Плановий розрахунковий економічний ефект від експлуатації цього комплексу становить 7554 тис. грн/рік (за цінами 2012 року).

Результати випробувань і впровадження розробленої автоматизованої системи багатокритеріальної ідентифікації стану та керування гідротранспортом збагачувальної фабрики свідчать про її достатньо високу ефективність, що дозволяє рекомендувати розроблені науково-технічні рішення для широкого використання на збагачувальних комбінатах.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення й нове розв'язання актуального науково-практичного завдання в галузі автоматизації процесів керування – визначення залежності амплітуди інфранизьких частот спектра миттєвої споживаної потужності електродвигуна шламового насоса від густини пульпи та рівня ансамблю середніх частот спектра потужності електродвигуна шламового насоса від положення заслінки; прийняття рішень в умовах інформаційної невизначеності за допомогою ситуаційної моделі; використанні моделей, що враховують зношення устаткування задля здобуття еталонних спектрів і використання запропонованої самонавчальної нейроподібної системи для багатокритеріальної ідентифікації станів і керування процесом внутрішньофабричного гідротранспортування, що дозволяє при роботі технологічного устаткування в передаварійних і аварійних режимах підвищити точність і достовірність ідентифікації стану системи гідротранспорту.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у тому, що:

1. Аналіз стану автоматизації керування ТП гідротранспортування в умовах вітчизняних ГЗК показав, що поряд з актуальністю проблеми та достатньо великою кількістю розробок, пропозицій і досліджень у цьому напрямку нині, практично, відсутні промислові зразки АСК системами гідротранспортування, які враховують зношування обладнання в процесі роботи, та дозволяють підлаштування АСК під існуючі параметри, а існуючі дотепер методи керування цими процесами не забезпечують повною мірою ефективне розв'язання таких достатньо складних завдань в умовах рудозбагачувального виробництва.

2. Розроблено та сформовано перелік відмов гідротранспортних систем, втілений у схему причинно-наслідкових зв'язків, ознак і станів гідротранспортних систем, що охоплює понад 50 чинників. Запропоновано теоретико-множинний підхід у визначенні стану гідротранспортної мережі гірничо-збагачувального підприємства. Цей підхід уможливорює визначення нормальних, передаварійних і аварійних режимів роботи внутрішньофабричних гідротранспортних систем. Розроблено ситуаційну модель ухвалення управлінських рішень, яка, на відміну від раніше відомих рішень, дає змогу визначати стан системи гідротранспортування в умовах інформаційної невизначеності.

3. Експериментально встановлено, що різні дефекти й відмови системи гідротранспортування викликають підвищений рівень активності на різних частотах спектра споживаної миттєвої активної потужності привідного електродвигуна шламового насоса. Уперше встановлено, що зміни амплітуди інфранизьких частот (у діапазоні від 0 до 3,0 Гц) спектра споживаної миттєвої активної потужності електродвигуна шламового насоса прямо пропорційні змінам густини пульпи (критерій Фішера для яких становить 1,86, при табличному значенні 1,53), що транспортується. Експериментальні дослідження також показали, що зміни амплітуди середніх частот спектра (зокрема, 32, 38, 45, 125 Гц) пропорційні ступеню відкриття заслінки, а їх добуток обернено пропорційний ступеню відкриття заслінки, при тому, що критерій Фішера для добутку становить 1,78, при табличному значенні 1,53, що підвищує швидкодію системи ідентифікації стану процесу гідротранспортування.

4. Запропоновано обґрунтований комплексний метод ідентифікації за показниками миттєвої потужності привідного електродвигуна шламового насоса, густини пульпи й положення заслінки на ньому, створений з урахуванням нейроподібної структури, з відмінною можливістю пристосовування до змінних умов експлуатації внутрішньофабричної гідротранспортної системи. Установлено, що коефіцієнт довіри прийнятого рішення щодо методів їх діагностики прямо пропорційний запропонованому коефіцієнту ідентифікації стану устаткування, що дозволяє нейроподібній структурі підвищити загальний коефіцієнт точності цього рішення порівняно з кожним із методів першого ступеня в середньому на 12,7 %.

5. Для практичної реалізації методу контролю розроблено методичне та програмне забезпечення щодо досліджень оперативного технічного стану систем гідротранспорту в процесі експлуатації. Розроблену методику контролю стану гідротранспортної системи збагачувальної фабрики за показниками споживаної миттєвої активної потужності електродвигуна ШН залежно від густини пульпи,

положення заслінки й інших технологічних режимів передано для застосування в дослідницьких і навчальних програмах Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та Придніпровської державної академії будівництва і архітектури. Рекомендації, які містять методи, запропоновані в даній роботі, є упровадженими на збагачувальній фабриці «Тандем Торг ТПК». Розрахунковий економічний ефект, що очікується від експлуатації запропонованого комплексу, складає 7554 тис. грн/рік (у цінах 2012 р.).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Приходченко С.Д. Система поддержки принятия управляющих решений для системы внутрифабричного гидротранспорта / С.Д. Приходченко // Электрификация и энергосбережение: Сборник статей. Отдельный выпуск Горного Информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). – М.: ГОРНАЯ КНИГА, 2009. – №8. – С. 51–61.
2. Приходченко С.Д. Застосування суматора, що здатен до навчання, в системі підтримки прийняття рішень для внутріфабричного гідротранспорту / С.Д. Приходченко // Гірничя електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2010. – Вип. 85. – С. 96–102.
3. Приходченко С.Д. Определение причинно-следственных связей диагностических параметров и состояний системы внутрифабричного гидротранспорта / Л.И. Мещеряков, С.Д. Приходченко, С.В. Самуся // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2011. – № 36(2). – С. 160–166.
4. Приходченко С.Д. Идентификация диагностических параметров и состояний системы внутрифабричного гидротранспорта / Л.И. Мещеряков, С.Д. Приходченко // Геотехническая механика : межвед. сб. научн. трудов. – Днепропетровск. – 2012. – Вып. 101. – С. 211–216.
5. Приходченко С.Д. Структурный синтез АСУ системы гидротранспортирования на основе принципа симметрии / С.Д. Приходченко, Л.И. Мещеряков // Геотехническая механика : межвед. сб. научн. трудов. – Днепропетровск. – 2012. – Вып. 97. – С. 289–293.
6. Приходченко С.Д. Критерии оценки и статистическая обработка результатов диагностики состояния систем гидротранспортирования / Т.А. Желдак, С.Д. Приходченко // Гірничя електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2012. – Вип. 89. – С. 83–87.
7. Приходченко С.Д. Моделирование системы автоматизации внутрифабричного гидротранспорта с применением метода контроля по предсказывающей модели / Л.И. Мещеряков, С.Д. Приходченко // Збірник наукових праць НГУ. – 2013. – №42. – С. 144–151.

8. Приходченко С.Д. Моделирование системы гидраттранспортирования пульпы в шламохранилища / С.Д. Приходченко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2014. – №2(287). – С. 97–99.

9. Приходченко С.Д. Застосування теоретико-множинного підходу і системи керування по ситуаційній моделі для мережі внутрішньофабричного гідротранспортування / Л.І. Мещеряков, С.Д. Приходченко // *Методи та прилади контролю якості*. – 2016. – №1(36). – С. 5–9.

10. Приходченко С.Д. Алгоритмический синтез оптимальных регуляторов буровых комплексов на структуре динамических моделей / Л.И. Мещеряков, С.Д. Приходченко, Л.А. Заика // *Збірник наукових праць НГУ*. – 2017. – №52. – С. 305–314.

11. Prykhodchenko S.D. Electromechanics system modelling of hydrotransport at an enrichment plant / I.M. Udovik, A.I. Simonenko, O.A. Zhukova, S.D. Prykhodchenko // *Науковий вісник НГУ*. – 2018. – №1(163). – С. 112–118.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

12. Приходченко С.Д. Моделювання і управління системою внутріфабричного гідротранспорту / С.Д. Приходченко // *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості : зб. тез доп. Всеукр. наук.-практ. конф. аспірантів, молодих учених і студентів*. – Івано-Франківськ, 2013. – С. 35–37.

13. Приходченко С.Д. Алгоритм выбора вариантов технологий переработки углеотходов / В.Л. Приходченко, С.Д. Приходченко, А.И. Слащев // *Опыт прошлого – взгляд в будущее : матер. Междунар. научн.-практ. конф. молодых ученых и студентов, 27–28 окт. 2011 г.* – Тула, 2011. – С. 80–85.

14. Приходченко С.Д. Встроенная динамическая модель системы автоматизации внутрифабричного гидротранспорта горных предприятий / С.Д. Приходченко // *Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості : зб. наук. пр. XII Міжн. конф., 23–24 листопада 2016 р.* – Дніпро: НГУ, 2017. – №2. – С.75–78.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

15. Приходченко С.Д. Искусственный нейрон со сложной функцией активации / С.Д. Приходченко // *Науковий вісник НГУ*. – 2004. – №10. – С. 92–94.

16. Приходченко С.Д. Выбор оптимального варианта переносной системы сбора и обработки диагностических данных горных агрегатов / О.Ю. Селезень, С.Д. Приходченко // *Геотехническая механика : межвед. сб. научн. трудов.* – Днепропетровск. – 2005. – Вып. 55. – С. 189–196.

17. Приходченко С.Д. Зависимость спектра потребляемой мощности электродвигателя насоса от физических параметров механизма / С.Д. Приходченко // *Геотехническая механика : межвед. сб. научн. трудов.* – Днепропетровск. – 2006. – Вып. 64. – С. 123–129.

18. Приходченко С.Д. Экспериментальное исследование процесса гидротранспортирования шлама по потребляемой двигателем насоса мощности / С.Д. Приходченко // *Гірнична електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб.* –

Дніпропетровськ. – 2006. – Вип. 77. – С. 113–119.

19. Приходченко С.Д. Создание переносной системы сбора и обработки диагностических данных горных агрегатов / С.Д. Приходченко // Геотехническая механика : межвед. сб. научн. трудов. – Днепропетровск. – 2006. – Вып. 61. – С. 297–302.

20. Приходченко С.Д. Выбор алгоритмов автоматизированной оценки функционального состояния объекта с применением технологий искусственного интеллекта / С.Д. Приходченко // Геотехническая механика : межвед. сб. научн. трудов. – Днепропетровск. – 2006. – Вып. 66. – С. 231–235.

21. Приходченко С.Д. Анализ современных моделей гидротранспортных систем / С.Д. Приходченко // Гірничя електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2007. – Вип. 78. – С. 56–62.

22. Приходченко С.Д. Анализ результатов промышленных испытаний двигателей шламовых насосов / С.Д. Приходченко // Геотехническая механика : межвед. сб. научн. трудов. – Днепропетровск. – 2007. – Вып. 69. – С. 77–82.

23. Приходченко С.Д. Построение математической модели шламового насоса и исследование ее динамических характеристик / С.Д. Приходченко // Геотехническая механика : межвед. сб. научн. трудов. – Днепропетровск. – 2008. – Вып. 77. – С. 159–165.

24. Приходченко С.Д. Разработка SCADA-системы для внутрифабричного гидротранспорта / С.Д. Приходченко // Збірник наукових праць НГУ. – 2008. – №30. – С. 135–141.

АНОТАЦІЯ

Приходченко С.Д. Багатокритерійна ідентифікація стану та керування гідротранспортом збагачувальної фабрики на основі нейрорподібної структури. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – ДВНЗ «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки України, Кривий Ріг, 2019.

Дисертація присвячена розробленню системи інтелектуальної ідентифікації та підтримки керуючих рішень для гідротранспорту збагачувальної фабрики. Розв'язано завдання визначення залежності амплітуди інфранизьких частот спектра миттєвої споживаної потужності електродвигуна шламового насоса від густини пульпи та рівня ансамблю середніх частот спектра потужності електродвигуна шламового насоса від положення заслінки, що дозволяє при роботі технологічного устаткування в передаварійних і аварійних режимах підвищити точність керування й достовірність ідентифікації стану системи гідротранспорту.

Запропоновано математичні моделі системи гідротранспортування, перша з яких заснована на методі операторної форми ланцюгових дробів, а друга – на моделюванні методом Джеффкотта-Лавалля, що дозволяють внесення поправочних коефіцієнтів для більш точного й адекватного опису контрольованої гідротранспортної мережі. Проведено математичне моделювання нормальних і аварійних режимів роботи в системі гідротранспорту збагачувальної фабрики,

підтверджене результатами експериментальних досліджень в умовах ПрАТ «Полтавський ГЗК».

Розроблено метод автоматичного багатокритерійного контролю стану системи гідротранспорту на базисі нейроподібної структури, заснований на аналізі спектральних характеристик миттєвої потужності двигуна шламового насоса. Розроблена система, порівняно з будь-яким із методів, використаних у ній, дає приріст точності від 15 % до 0,7 % на даних без урахування зношування елементів конструкції. Для даних, змодельованих із урахуванням зношування та старіння деталей, порівняно з даними, які не враховують зношування елементів системи, точність зростає ще в середньому на 3 %.

Рекомендації, що містять методи, запропоновані в даній роботі, упроваджено на збагачувальній фабриці «Тандем Торг ТПК».

Ключові слова: гідротранспорт, автоматична ідентифікація, система підтримки прийняття рішень, багатокритерійність, керування, нейроподібна структура.

АННОТАЦИЯ

Приходченко С.Д. Многокритериальная идентификация состояния и управления гидротранспортом обогатительной фабрики на основе нейроподобной структуры. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – ГВУЗ «Криворожский национальный университет» Министерства образования и науки Украины, Кривой Рог, 2019.

Диссертация посвящена разработке системы интеллектуальной идентификации и поддержки управляющих решений для гидротранспорта обогатительной фабрики. Решена задача определения зависимости амплитуды инфранизких частот спектра мгновенной потребляемой мощности электродвигателя шламового насоса от плотности пульпы и уровня ансамбля средних частот спектра мощности электродвигателя шламового насоса от положения заслонки, что позволяет при работе технологического оборудования в предаварийных и аварийных режимах повысить точность управления и достоверность идентификации состояния системы гидротранспорта.

Предложены математические модели системы гидротранспортирования, первая из которых основана на методе операторной формы цепных дробей, а вторая – на моделировании методом Джеффкотта-Лавалья, позволяющие внесение поправочных коэффициентов для более точного и адекватного описания контролируемой гидротранспортной сети. Проведено математическое моделирование нормальных и аварийных режимов работы в системе гидротранспорта обогатительной фабрики, подтвержденное результатами экспериментальных исследований в условиях ЧАО «Полтавский ГОК».

Проведенные в условиях второй обогатительной фабрики ЧАО «Полтавский ГОК» экспериментальные исследования показали сходимость теоретической модели и практически полученных результатов. Анализ

экспериментальных спектральных характеристик подтверждает достоверность полученных теоретических закономерностей формирования выходных сигналов системы гидротранспорта, а именно: смещение соответствующих пиков спектра при износе оборудования по сравнению с спектральными характеристиками нового оборудования.

Для осуществления анализа функционального состояния ГТС, перспективным считается подход, согласно которому для анализа сигналов, поступающих одновременно задействованы как статистические методы, так и методы искусственного интеллекта. Для решения этой проблемы, разработаны информационное и программное обеспечение интеллектуальной поддержки принятия решений в условиях неопределенности при управлении гидротранспортом. Предложенный алгоритм отличается от ранее представленных схем для анализа наличия именно параллельной работы методов распознавания. Разработанная система функционирует на основе методов распознавания и методов искусственного интеллекта, с применением примеров, способствующих структурированию выводов и рекомендаций, направленных на действия человека-диспетчера. Разработан метод автоматического многокритериального контроля состояния системы гидротранспорта на базе нейроподобной структуры, основанный на анализе спектральных характеристик мгновенной мощности двигателя шламового насоса. Разработанная система, по сравнению с любым из методов, использованных в ней, дает прирост точности от 15% до 0,7% на данных без учета износа элементов конструкции. Для данных, смоделированных с учетом износа и старения деталей по сравнению с данными, которые не учитывают износ элементов системы, точность возрастает еще в среднем на 3%.

Рекомендации, содержащие методы, предложенные в данной части работы, внедрены на обогатительной фабрике «Тандем Торг ТПК».

Ключевые слова: гидротранспорт, автоматическая идентификация, система поддержки принятия решений, многокритериальность, управления, нейроподобная структура.

ABSTRACT

Prykhodchenko S.D. Multicriteria identification of the hydrotransport's state and management of the concentrating mill on the basis of a neural-like structure. – Manuscript.

The thesis for the Degree of Candidate of Technical sciences in the specialty 05.13.07 – automation of control processes. – SIHE «Kryvyi Rih National University», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kryvyi Rih, 2019.

The dissertation is devoted to development of the intellectual identification system and concentrating mill's hydrotransport control decisions support. The problem of determining the dependence of the infralow frequencies amplitude of the slurry pump motor's instantaneous power consumption spectrum on the pulp density and the level of the ensemble of average frequencies of the slurry pump motor's power spectrum from the position of the damper is solved that allows to increase the accuracy of control and authenticity of identification during operation of the technological equipment in the

transmission and emergency modes.

The mathematical models of the hydrotransportation system are proposed, the first one is based on the method of the chain fractions' operator form and the second one is on the simulation of the Jeffcott-Laval method that allows the introduction of correction coefficients for a more accurate and adequate description of the controlled hydrotransport network. The mathematical modeling of normal and emergency modes of operation in the hydrotransport system of the concentrating mill was carried out and confirmed by the results of experimental research in the conditions of «Poltava mining and concentrating combine».

The method of automatic multicriteria control of the hydrotransport' system state on the neural-like structure's basis that is based on the analysis of the instantaneous engine power's spectral characteristics of a slurry pump is developed. The developed system, in comparison with any of the methods used in it, gives an increment of accuracy from 15% to 0,7% on the data without considering the tearing of the design elements. For data modeled considering the tearing and aging of parts compared with data that does not consider the deterioration of system elements, accuracy increases by an average of 3%.

Recommendations that include the methods suggested in the given research are implemented at concentrating mill «Tandem Torg TPK».

Key words: hydrotransport, automatic identification, decision support system, multi criteria, control, neural-like structure.

Підписано до друку 08.04.2019 р.
Гарнітура Times. Друк різнографічний.
Папір офсетний. 0,9 умов. друк. арк.
Тираж 100 прим. Зам. №225
Друк ТОВ "БАРВІКС"
Свідоцтво про внесення до державного реєстру
№24 від 25.07.2000 р.
49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 21