

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Міністерство освіти і науки України

ДВНЗ «Криворізький національний університет»

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

ПРИХОДЧЕНКО СЕРГІЙ ДМИТРОВИЧ

УДК 681.5.037.5:[622.753:004.032.26]

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.13.07 – автоматизація процесів керування

15 – Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

С.Д. Приходченко

Науковий керівник **Мещеряков Леонід Іванович**, доктор технічних наук, професор

Кривий Ріг – 2019

АНОТАЦІЯ

Приходченко С.Д. Багатокритерійна ідентифікація стану та керування гідротранспортом збагачувальної фабрики на основі нейроподібної структури. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 «Автоматизація процесів керування» (15 – Автоматизація та приладобудування). – Виконана у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» МОН України, Дніпро, захист у ДВНЗ «Криворізький національний університет» МОН України, Кривий Ріг, 2019.

Тема дослідження присвячена системам гідротранспортування на гірничо-збагачувальних підприємствах та процесу контролю їх стану. Концепція дослідження полягає в наступному: моніторинг стану експлуатаційних характеристик шламових насосів, широко вживаних для транспортування при збагаченні гірничих порід, здатний дати економію споживаної енергії від 9 до 21 %, де верхня межа обумовлена конструктивними доопрацюваннями, а нижня – обумовлена своєчасним і повним обслуговуванням насосних агрегатів. Таким чином, завдання ідентифікації стану процесу гідротранспортування матеріалів усередині підприємства є одним з найбільш важливих завдань сучасного гірничо-збагачувального комплексу зокрема, і України в цілому.

Нині контроль стану системи гідротранспортування здійснюється оператором, який приймає керуючі рішення по процесу гідротранспортування, спираючись на інформацію вторинних приладів. Зважаючи на великий обсяг первинної інформації оператору складно своєчасно комплексно оцінити поточну ситуацію, що часто, призводить до істотного запізнювання в ухваленні оперативних рішень. Особливо критичними до запізнювання ухвалення рішень є передаварійні та аварійні стани вузлів системи гідротранспорту.

Таким чином, мета дисертаційної праці полягає у з'ясуванні основних тенденцій і напрямків, спрямованих на підвищення ефективності ідентифікації

стану та керування устаткуванням гідротранспорту в гірничо-збагачувальних комбінатах за рахунок багатокритерійної ідентифікації стану об'єкта і підтримки прийняття управлінських рішень в профілактичному обслуговуванні та під час ремонту, що впливатиме на збільшення продуктивності роботи устаткування й скоротить витрати на його обслуговування.

У першому розділі дисертаційної роботи «Аналіз методів і систем керування гідротранспортом збагачувальних фабрик» виконано аналіз відомих моделей, методів та систем керування гідротранспортними мережами. Типова гідротранспортна система складається з приймальних і напірних резервуарів з необхідною арматурою, трубопроводів, насоса, двигуна, системи вимірювальних приладів, а також пристроїв, необхідних для заповнення насосів рідиною перед пуском. Окрім цього, до елементів гідротранспортної системи відносяться такі елементи, як пускові пристрої двигуна та агрегати автоматичного керування.

Проведений аналіз моделей гідротранспортних систем показав, що основною характеристикою трубопровідної системи є залежність «Тиск-Подача», яка стабілізована в оптимальній робочій точці. Крім того, показано, що обґрунтування методів контролю систем гідротранспорту носить здебільшого емпіричний характер, а існуючі моделі гідротранспортних систем не враховують зносу 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 задовільному стані роботи, а також системі підтримки керівних рішень, що базуються на цій моделі.

У другому розділі «Моделювання і діагностика стану процесу внутрішньофабричного гідротранспортування» виконані теоретичні дослідження процесів формування сигналів, що характеризують стан системи гідротранспорту. Показано, що найбільш перспективним для обліку несталого руху пульпи, обліку зносу системи гідротранспорту, а також можливості підлаштування моделі в процесі експлуатації, є метод багатомасових роторів

Джеффкотта та метод ланцюгових дробів, що дозволяє вносити зміни у відображення в операторній формі електромеханічної конструкції шламового насоса, а також вносити в модель корегування в процесі роботи шляхом зміни та перерахунку ланок рівняння.

На основі дослідження шламового насоса 5-ГРк8, складена схема взаємодії частин, що рухаються для даного агрегату та побудовано модель шламового насоса на основі ланцюгових дробів та модель одиничної системи гідротранспортування з цим насосом у якості головного елемента.

Для моделей, взятих у якості базових, досліджені їх динамічні характеристики в системах комп'ютерного моделювання. При розрахунку математичної моделі, що враховує задані параметри, були отримані амплітудно-частотні характеристики динамічної моделі системи гідротранспорту, що лягли в основу еталонної таблиці «Режим роботи – Спектр споживаної миттєвої активної потужності». При введенні в модель елементів, що імітують знос роликів підшипника (зменшення його діаметра на 2 %) амплітудно-частотна характеристика змінилася таким чином: частота обертання підшипників збільшилася на 2–3 відсотки і з'явилася додаткова частота вібрації, рівна подвоєній частоті вібрації підшипників.

Застосовуючи концепцію про представлення шламового насоса у вигляді системи роторів Джеффкотта-Лавалю запропоновано вважати, що кожна рухома деталь механізму представлена у вигляді ротора Джеффкотта-Лавалю, сполученого з сусідніми елементами пружним з'єднанням.

Після детального аналізу несправностей та нештатних ситуацій на гідротранспорті, було сформовано схему причинно-наслідкових зв'язків аварійних ситуацій, несправностей і їх ознак, а подальша обробка і декомпозиція цієї схеми, а також аналіз зведеної таблиці несправностей, дозволили скласти таблицю, що містить список елементів, список несправностей для кожної з них, список ознак, супроводжуючих кожен несправність та методи діагностики й ремонту. За наслідками аналізу даної таблиці були сформовані схеми «Елемент-Відмова-Ознака» для кожної з деталей. Як показав проведений аналіз залежності

різних параметрів до стану системи в цілому, залежність між спектральним контролем споживаної миттєвої потужності та загальним станом агрегату складає від 89 до 91,5 %, а залежність від суми таких параметрів як миттєва потужність, положення заслінки, густина пульпи при відомих технічних параметрах трубопровідної системи складає 97–98,3 %, що дозволяє використовувати ці параметри для повноцінного контролю і діагностики внутрішньофабричної гідротранспортної системи.

Для вирішення задачі аналізу поточного стану об'єкту досліджень запропоновано використовувати теоретико-множинний підхід, що дозволяє проводити аналіз множини інформаційних повідомлень, об'єктів і т.п. з погляду їх кількісних ознак. Зміст пошуку якісного аспекту інформації полягає в тому, щоб виділяти, вивчати і досліджувати характеристики множини повідомлень у зв'язку з якісними моментами частин, що складають її. У результаті проведених досліджень запропоновані діагностичні ознаки станів системи гідротранспортування, які застосовані для побудови одного з модулів аналізу стану в розробленому методі автоматичного контролю стану системи гідротранспорту, що описан в четвертому розділі дисертації.

Результативність дослідження була досягнута завдяки прийомам дослідження: організації, моделюванню, вивченню документів, аналітичним, розрахунковим, розрахунково-обчислювальним і логічним розробкам. Результатом наукового прогнозування стало обґрунтування основних моделей систем гідротранспорту гірничо-збагачувальних підприємств.

У третьому розділі «Експериментальні дослідження методів діагностики і контролю внутрішньофабричного гідротранспортування» приведені результати експериментальних досліджень, які підтверджують отримані теоретичні закономірності формування спектральних характеристик споживаної миттєвої потужності привідного двигуна шламового насоса.

Проведені в умовах другої збагачувальної фабрики Полтавського ГЗКу експериментальні дослідження показали збіжність теоретичної моделі та практично отриманих даних. Крім того, була показана необхідність введення в

модель додаткової передавальної ланки, що враховує положення трубопроводу та відповідає за коливання, які спричинені нерівномірністю протікання пульпи в трубопроводі.

Запропонована в другому розділі модель системи гідротранспорту уточнена шляхом введення додаткової ланки, що моделює коливання трубопроводів.

Виконані перевірки однорідності за критеріями Фішера і Бартлетта, які показали однорідність оцінок дисперсії відтворюваності, для критерію Фішера оцінка склала 2,59; для критерію Бартлетта перевірка показала, що цей коефіцієнт значущий на рівні менше 0,02, що свідчить про надійність обчислення кореляційної матриці.

На основі отриманих раніше даних була вироблена перевірка адекватності запропонованих моделей.

У результаті вищеописаних дій були отримані такі показники: оцінка адекватності моделей шламового насоса, що описані у другому розділі, та експериментальних даних, отриманих у результаті експерименту, показала, що оцінка дисперсії адекватності моделі істотно менше табличного значення, що підтверджує високу точність збіжності теоретичних і експериментальних даних і адекватність запропонованої моделі.

Проведений в пакеті MATLAB аналіз отриманих даних показав, що вибрана модель з високою точністю і достовірністю описує істинну залежність.

Аналіз експериментальних спектральних характеристик підтверджує правильність отриманих теоретичних закономірностей формування вихідних сигналів системи гідротранспорту, а саме:

- зсув відповідних піків спектру при зносі устаткування в порівнянні із спектральними характеристиками нового устаткування;
- кореляційну залежність між спектром вібрації і спектром активної миттєвої споживаної потужності.

Таким чином, теоретичними і експериментальними дослідженнями є встановлені закономірності формування енергетичних сигналів системи гідротранспорту, які можуть бути використані для оцінки поточного і прогнозу

подальшого стану системи.

У четвертому розділі «Розробка системи інтелектуальної підтримки ухвалення рішень процесу внутрішньофабричного гідротранспортування» наведено розроблений метод автоматичного контролю стану системи гідротранспорту, який заснований на аналізі спектральних характеристик миттєвої потужності двигуна шламового насоса. У роботі запропонована наступна структура АСК процесом гідротранспортування: насос приводиться в рух приводом, перед яким встановлений ПМК-контролер. Зворотний зв'язок від насоса надходить на вхід контролера. Також враховуються обурення моделі та обурення насоса. Аналіз результатів моделювання показав, що система в цілому працює стабільно, не входячи в резонанс. Крім того, амплітуда коливань системи на 20 % менше ніж при регулюванні ПІД-регулятором.

Для аналізу функціонального стану контрольованого об'єкту, більш перспективним є підхід, при якому для аналізу сигналів, що надходять, паралельно задіяні як статистичні методи, так і методи штучного інтелекту. Для вирішення даної проблеми, розроблений програмно-апаратний комплекс NGU-Hydra, який є системою підтримки прийняття рішень, та об'єднує в своєму складі системи ідентифікації та діагностики об'єкту, та методи системи керування, на основі яких проводиться підтримка прийняття рішень.

Запропонований алгоритм відрізняється від раніше запропонованих схем аналізу наявністю паралельної роботи методів розпізнавання. Розроблена система функціонує на основі методів розпізнавання і методів штучного інтелекту, заснованих на використуванні прикладів, для побудови висновків і рекомендацій до дій людини-диспетчера.

В ході експериментальної перевірки запропонованих критеріїв на модельних і експериментальних даних, отриманих від реального об'єкту, були отримані високі оцінки якості розпізнавання поточного стану ВГТС, що характеризується більшою точністю порівняно із стандартними методами, що застосовувалися раніше.

Особливо показові результати застосування системи із запропонованими критеріями ухвалення рішень для розпізнавання стану ВГТС, що знаходиться в зношеному стані: точність розпізнавання стає значно вищою, ніж у методі відомому раніше.

Таким чином, розроблена система здатна до розпізнавання сигналів, що надходять від гідротранспортної системи, і дає рекомендації до дії диспетчеру, який контролює роботу системи внутрішньофабричного гідротранспорту.

Рекомендації, що містять методи, запропоновані в даній частині роботи, запроваджені на збагачувальній фабриці «Тандем Торг ТПК».

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

ABSTRACT

Prykhodchenko S.D. Multicriteria identification of the hydrotransport's condition and management of the concentrating mill on the basis of a neural-like structure. – Qualifying scientific work as manuscript.

The thesis for the Degree of Candidate of Technical sciences in the specialty 05.13.07 «Automation of control processes» – It is carried out at National Technical University «Dniprovskia Politekhnik» of MES of Ukraine, Dnipro, the thesis defense will be held at SIHE «Krivyi Rih National University» of MES of Ukraine, Kryvyi Rih, 2019.

The research subject is devoted to the systems of hydrotransportation at mining and processing enterprises and their condition control process. The research concept is: the condition monitoring of the slurry pumps' operating specifications widely used for transportation while rocks enriching that is capable to provide power consumption efficiency from 9 to 21%, where the upper limit is due to the constructive improvements and the bottom is due to timely and complete service of pump units. Thus, the task of condition identifying of materials hydrotransportation process within the enterprise is one of the most important tasks of the modern mining and concentrating complex in particular and of Ukraine as a whole.

Nowadays, the control of the hydrotransportation system condition is carried out by the operator who takes control decisions on the process of hydrotransportation based on the information of the secondary devices. Taking into account the large amount of initial information, it is difficult for the operator to evaluate the current situation in due time that often leads to a significant delay in the operative decisions making. Emergency and pre-emergency conditions of the hydrotransport system nodes are especially crucial to the delay of decision-making.

Thus, the purpose of the thesis is to elucidate the main tendencies and directions aimed at increasing the state identification efficiency and the management of the hydrotransport equipment at the mining and processing enterprises due to the multicriteria identification of the object condition and the support of making

managerial decisions in preventive maintenance and during the repair that will affect the productivity of the equipment and reduce the cost of its maintenance.

The analysis of known models was performed in the first section of the thesis «Analysis of hydrotransport control system and methods at concentrating mills», methods and control systems of hydrotransport networks were performed. The typical hydrotransport system consists of receiving and pressure vessels with the necessary fittings, pipelines, pump, engine, measuring system, as well as devices required to fill the pumps with a liquid before starting up. In addition, elements of the hydrotransport system include elements such as engine starters and automatic control units.

The conducted analysis of hydrotransport systems models demonstrated that the main features of the pipeline system is the dependence of the «Pressure-Supply» that is stabilized at the optimal operating point. Besides, it was shown that the hydrotransport systems control methods reasoning is mostly empirical and existing models of hydrotransport systems do not consider the wear of equipment in operation.

The above-stated disadvantages of conditions control systems and hydrotransport control systems of concentrating mills lead to the necessity of constructing a hydrotransport system model that takes into account the wear of the elements and it allows to make changes to the model with a satisfactory state of work as well as a support system of control solutions based on this model.

The theoretical investigations of the signals formation processes that characterize the hydrotransport system condition were performed in the second section «Modeling and diagnostics of the process of inter-factory hydrotransportation condition». It is shown that the most promising method for recording the unstable pulp movement taking into account the wear of the hydrotransport system as well as the possibility of adjusting the model during operation is the method of multi-mass rotors of Jeffcott and the method of chain fractions that allows to introduce changes in the reflection in the operator form of the electromechanical structure of the slurry pump and to make adjustments to the model in the process of work by changing and recalculating units of the equation.

The scheme of parts interaction moving for this unit is compiled based on the research of a 5-GRk8 slurry pump and a model of the slurry pump based on chain fractions and the model of a single system of hydrotransportation with this pump as the main element are constructed.

The models' dynamic characteristics in computer simulation systems are investigated taken as the basic ones. The amplitude-frequency characteristics of the dynamic model of the hydrotransport system were obtained calculating the mathematical model that consider the given parameters that form the basis of the reference table «Operating mode – Spectrum of instantaneous active power consumption». Introducing into the model elements that mimic the wear of roller bearings (diminishing its diameter by 2%), the amplitude-frequency characteristic changed as follows: the speed of the bearings increased by 2–3 percent and an additional frequency of vibration appeared that is equal to doubled frequency of the bearings vibration.

Applying the concept of the slurry pump demonstration in the form of a Jeffcott-Laval rotor system it is proposed to assume that each moving part of the mechanism is represented as a Jeffcott-Laval rotor connected to the adjacent elements by an elastic connections.

After a detailed analysis of malfunctions and abnormal situations in the hydrotransport, a scheme of causal relationships of emergency situations, malfunctions and their signs was formed and further processing and decomposition of this scheme as well as analysis of the consolidated table of malfunctions allowed to compile a table containing a list of elements, a list of faults for each of them, a list of features that accompany each malfunction and methods of diagnosis and repair. As a result of this table analysis the «Element-Denial-Sign» the schemes for each of the details were formed. The various parameters dependence conducted analysis on the system condition as a whole demonstrate the dependence between the spectral control of the consumed instantaneous power and the general condition of the aggregate ranges from 89% to 91.5% and the dependence on the sum of such parameters as instantaneous power, valve position, pulp density at the known technical parameters of the pipeline

system is 97–98.3% that allows to use these parameters for proper control and diagnostics of the inter-factory hydrotransport system.

It is proposed to use the multi-theoretical approach that allows to analyze a plurality of information messages, objects, etc. in terms of their quantitative characteristics to solve the problem of analyzing the current condition of the research object. The content of the search for a qualitative aspect of information is to distinguish, study and investigate the characteristics of messages plurality due to the qualitative moments of the parts that make it up. As a result of the conducted researches, diagnostic signs of hydrotransportation system conditions that are used for construction of one of the modules of the condition analysis in the developed method of the hydrotransport system condition automatic control performed in the fourth unit of the dissertation are proposed.

The study's effectiveness was achieved through the methods of research: organization, modeling, documents' studying, analytical, computational, computational and logical developments. The result of scientific forecasting was the basic models systems reasoning of mining and concentrating enterprises' hydrotransport.

The results of experimental studies confirming the obtained theoretical patterns of the instantaneous power consumption spectral characteristic formation of the slurry pump' driven motor in the third section «Experimental studies of diagnostics methods and control of inter-factory hydrotransportation» are quoted.

Experimental studies that were carried out at the 2nd concentrating mill of «Poltava GOK» conditions performed the convergence of the theoretical model and practically obtained data. In addition, the necessity to introduce into the model an additional transmission line that considers the positions of the pipeline and is responsible for fluctuations caused by uneven flow of pulp in the pipeline was performed.

The proposed model in the second section of the hydrotransport system is specified by introducing an additional link modeling the fluctuations of the pipelines.

The homogeneity tests were performed according to Fisher and Bartlett criteria that performed the homogeneity of the estimates of the reproducibility's dispersion, for

Fisher's criterion, the estimate was 2.59; for the Bartlett criterion, the test showed that this coefficient is significant at a level less than 0.02 which indicates the reliability of the correlation matrix calculation.

Based on the data obtained earlier, an adequacy check of the proposed models was developed.

As a result of the described-above procedures, the following indicators were obtained: the assessment of the slurry pump models adequacy described in the second unit and the experimental data obtained as the result of the experiment showed that the assessment of the model adequacy dispersion is significantly less than the table value that confirms the high accuracy of the convergence of theoretical and experimental data and adequacy of the proposed model.

The analysis of the data obtained in the MATLAB package showed that the selected model with high accuracy and reliability describes the true dependence.

The analysis of experimental spectral characteristics confirms the validity of the received theoretical patterns of output signals formation of the hydrotransport system, namely:

- the displacement of the corresponding spectrum's peaks at the equipment wear in comparison with the spectral characteristics of the new equipment;
- correlation dependence between the vibration spectrum and the spectrum of active instantaneous power consumption.

Thus, theoretical and experimental researches established the patterns of the hydrotransport system energy signals formation that can be used to assess the current and the forecast of the future condition of the system.

The developed method of hydrotransport system condition automatic control is determined based on the analysis of the spectral characteristics of the instantaneous engine power of the slurry pump in the fourth section «Development of the intellectual support system of the decision making process of the inter-factory hydrotransportation». The following structure of the ACS hydrotransport process is proposed in the research work: the pump is driven by a drive before which the MPC controller is installed. The feedback from the pump enters the controller's input. Also,

model indignation and perturbation of the pump are taken into account. The analysis of the simulation results performed that the system as a whole works in a sustained way without going into resonance. In addition, the amplitude of the system fluctuations is 20% less than with the regulation of the PID-regulator.

For the analysis of the functional condition of the controlled object, more promising approach is that one which includes both statistical methods and methods of artificial intelligence used simultaneously for the analysis of incoming signals. To solve this problem the software and hardware complex NGU-Hydra which is a decision support system is developed and integrates in its structure, the system of identification and diagnostics of the object and the methods of the control system on the base of which the support decision is made.

The proposed algorithm differs from the previously proposed schemes of analysis by the presence of parallel operation of recognition methods. The developed system operates based on recognition methods and methods of artificial intelligence that is based on the use of examples to make conclusions and recommendations for the actions of the human-controller.

During the experimental validation of the proposed criteria on model and experimental data obtained from a real object the high estimates of the quality of the recognition of the current IHTS condition were obtained that is characterized by greater accuracy compared to the standard methods applied earlier.

The particularly demonstrative results are the application of the system with the proposed decision criteria for the recognition of the IHTS condition that is in a worn condition: the accuracy of recognition becomes much higher than that of methods known earlier.

Thus, the developed system is able to recognize the signals received from the hydrotransport system and gives recommendations to the operation of the controller who controls the operation of the inter-factory hydrotransport system.

Recommendations containing the proposed methods in this part of the work are implemented at the concentrating mill «Tandem Trading TPK».

Key words: hydrotransport, decision support system, mining and concentrating mill, controlling system.

Список публікацій здобувача

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 // Гірнича 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 гидратранспортирования пульпы в шламохранилища / С.Д. Приходченко // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 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. Udovyyk, 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 // Гірничя 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.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ABSTRACT	9
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ	22
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ГІДРОТРАНСПОРТОМ ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ ФАБРИК.....	31
1.1. Аналіз існуючих гідротранспортних систем збагачувальних фабрик та їх конструктивних особливостей.....	31
1.2. Основні причини виникнення аварійних станів внутрішньофабричних гідротранспортних систем.....	34
1.3. Аналіз математичних моделей гідротранспортних систем гірничо- збагачувальних підприємств	43
1.4. Аналіз методів і систем автоматизованого діагностування та керування внутрішньофабричним гідротранспортом.....	53
Висновки до розділу 1	57
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ І ДІАГНОСТИКА СТАНУ ПРОЦЕСУ ВНУТРІШНЬОФАБРИЧНОГО ГІДРОТРАНСПОРТУВАННЯ	59
2.1. Моделювання електромеханічної системи внутрішньофабричного гідротранспорту.....	59
2.2. Формування математичної моделі електромеханічної системи шламового насоса.....	65
2.3. Діагностичні ознаки аварійних станів внутрішньофабричних гідротранспортних систем.....	73
2.4 Обґрунтування критеріїв ідентифікації стану системи гідротранспорту гірничо-збагачувального підприємства	77
Висновки до розділу 2	87
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ТА КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ	

ВНУТРІШНЬОФАБРИЧНОГО ГІДРОТРАНСПОРТУВАННЯ	88
3.1. Розробка методики експериментальних досліджень процесу внутрішньофабричного гідротранспортування шламів	88
3.2. Кореляційно-спектральний аналіз результатів досліджень процесу внутрішньофабричного гідротранспортування шламів	91
3.3. Уточнення моделі електромеханічної системи гідротранспорту гірничо-збагачувального підприємства	102
3.4. Узагальнений аналіз адекватності моделей внутрішньофабричної гідротранспортної системи	106
Висновки до розділу 3	108
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ ПРОЦЕСУ ВНУТРІШНЬОФАБРИЧНОГО ГІДРОТРАНСПОРТУВАННЯ	110
4.1. Розробка ситуаційної моделі ухвалення керуючих рішень в умовах інформаційної невизначеності	110
4.2. Розробка автоматизованої системи керування для мережі внутрішньофабричного гідротранспортування на основі методу прогностичної моделі керування	115
4.3. Вибір і розробка апаратно-програмних засобів системи підтримки ухвалення рішень для внутрішньофабричного гідротранспорту	124
4.4. Розробка блоку ідентифікації технічного стану системи гідротранспорту гірничо-збагачувального підприємства	130
Висновки до розділу 4	145
ВИСНОВКИ	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	149
ДОДАТОК А	165
ДОДАТОК Б	169
ДОДАТОК В	180
ДОДАТОК Г	181
ДОДАТОК Д	183

ДОДАТОК Е	186
ДОДАТОК Ж	188
ДОДАТОК И	190
ДОДАТОК К	192
ДОДАТОК Л	192
ДОДАТОК М	198

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ

АСУ – автоматизована система управління

АСК – автоматизована система керування

СМАП – споживана миттєва активна потужність

АСКТП – автоматизована система керування технологічним процесом

БД – база даних

ВГТС – внутрішньофабрична гідротранспортна система

ГЕМК – гірничій електромеханічний комплекс

ГЗК – гірничо-збачачувальний комбінат

ГС – гідротранспортна система

ЕС – експертна система

ЛАФЧХ – логарифмічна амплітудно-фазова частотна характеристика

МСК – мова ситуаційного керування

ПІ-регулятор – пропорційно-інтегральний регулятор

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор

ПМК – прогностична модель керування

СКГ – система контролю гідротранспорту

ШН – шламовий насос

ШВН – шламовий відцентровий насос

ERP – Enterprise Resource Planning

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сьогодні в умовах постійного здорожчання цін на енергоносії постає нагальне завдання суттєво знизити енерговитрати на виробництві. Виконання цього завдання можливе лише за умови впровадження на виробництво нових більш економічних агрегатів чи вдосконалення існуючих систем діагностики і керування агрегатами, що сприятимуть підвищенню його економічності.

Для ґрунтового аналізу та з'ясування питань щодо ефективності роботи гірничих технологічних комплексів, розробки системи контролю за станом внутрішньофабричного гідротранспорту в галузі автоматизації виробничих процесів і систем гідротранспортування уже традиційно вивчаються праці вітчизняних і зарубіжних учених: А.А. Азаряна, Б.О. Блюсса, В.О. Бреннера, Т.О. Бабенко, В.А. Воронова, Н.В. Глухової, В.І. Головка, М.І. Горбійчука, А.В. Докуніна, Ю.Г. Качана, В.О. Кондратця, Є.В. Кочури, А.І. Купіна, О.Н. Марюти, В.С. Моркуна, Л.І. Мещерякова, О.В. Садового, Є.В. Семененко, Б.М. Халимбекова, Das P., Halim E.B., Hrbček J., Jiménez-Cabas J., Wachel J.C. та інших. Утім зазначені наукові дослідження лише частково враховують питання, пов'язані зі зниженням енерговитрат на збагачувальних фабриках, що зумовлює появу нових напрямів дослідження.

Окремої уваги потребує завдання щодо зниження енерговитрат під час гідротранспортування матеріалів усередині підприємства – найактуальніше у діяльності сучасного гірничо-збагачувального комплексу зокрема й України загалом. Виконання цього завдання можливе лише за умови впровадження на підприємствах нових більш економічних агрегатів чи вдосконалення існуючих систем діагностики та керування технологічними процесами в гірничо-металургійній галузі, доля якої в Україні становить близько 22 % від усього обсягу електроенергії, споживаної в країні. Водночас від 30 до 40 % собівартості переробки мінеральної сировини належить системам транспортування.

Моніторинг стану експлуатаційних характеристик шламових насосів, широко застосованих у процесі збагачення гірських порід, здатний зекономити споживану енергію від 9 до 21 %, верхня межа якої зумовлена конструктивними доробками, а нижня – своєчасним і повним обслуговуванням насосних агрегатів.

Процес гідротранспортування шламів на гірничо-збагачувальному підприємстві характеризується неконтрольованими параметрами та збурюючими діями; водночас, будь-яке втручання в геометрію системи гідротранспорту викликає зміни в русі пульпових мас, що суттєво впливає на навантаження системи гідротранспортування. Аналіз засвідчив недосконалість існуючих підходів при здійсненні ідентифікації стану та керування гідротранспортом. Зокрема це стосується певних залежностей, критеріїв, методів та моделей автоматизованих систем керування, необхідності їх інтелектуалізації.

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 наукова задача визначення залежності частот спектру миттєвої споживаної 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 напрямку 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: [3, 4] – проведено аналіз відмов гідротранспортних систем і виділено діагностичні параметри; [5] – запропоновано модель автоматизованої системи керування для гідротранспорту збагачувальної фабрики; [6] – здійснено аналіз і статистичне оброблення результатів діагностики стану гідротранспортної системи; [7] – створено систему керування за передбачуваною моделлю; [9] – розроблено ситуаційну модель системи гідротранспорту; [10] – синтезовано оптимальний регулятор; [11] – сформовано електромеханічну модель системи гідротранспорту; [13] – розроблено електромеханічну модель системи гідротранспорту вуглевідходів; [16] – 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ГІДРОТРАНСПОРТОМ ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ ФАБРИК

1.1. Аналіз існуючих гідротранспортних систем збагачувальних фабрик та їх конструктивних особливостей

Найважливішими завданнями гірничорудної і гірничовидобувної промисловості завжди залишається підвищення продуктивності технологічних комплексів, що використовуються у виробництві, одночасно з пониженням енерговитрат цих агрегатів. Для подібних цілей широко поширений підхід, що полягає в модернізації й автоматизації вже існуючих систем [1, 2]. На гірничо-збагачувальних комбінатах (рис. 1.1) витрати на транспортування збагачуваної породи складають до 25 % [3], що робить системи транспортування одними з найважливіших об'єктів модернізації і автоматизації.

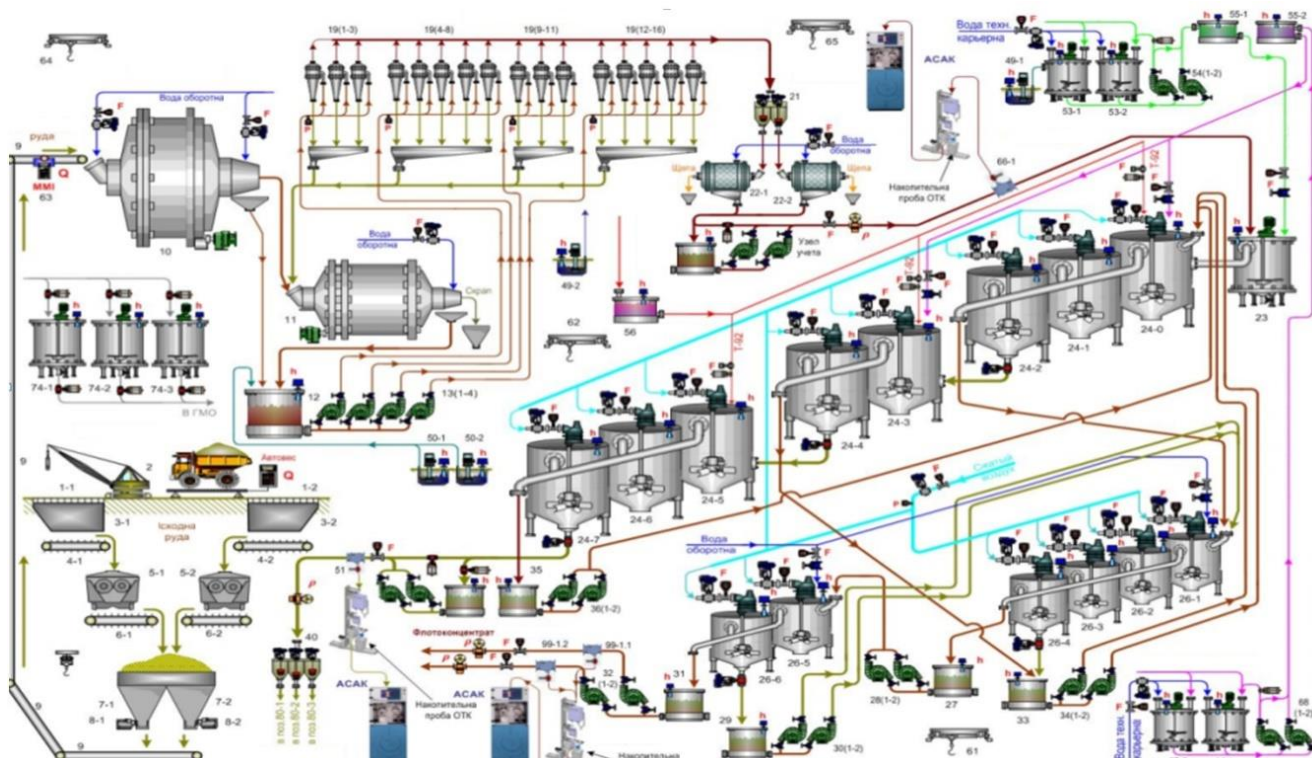
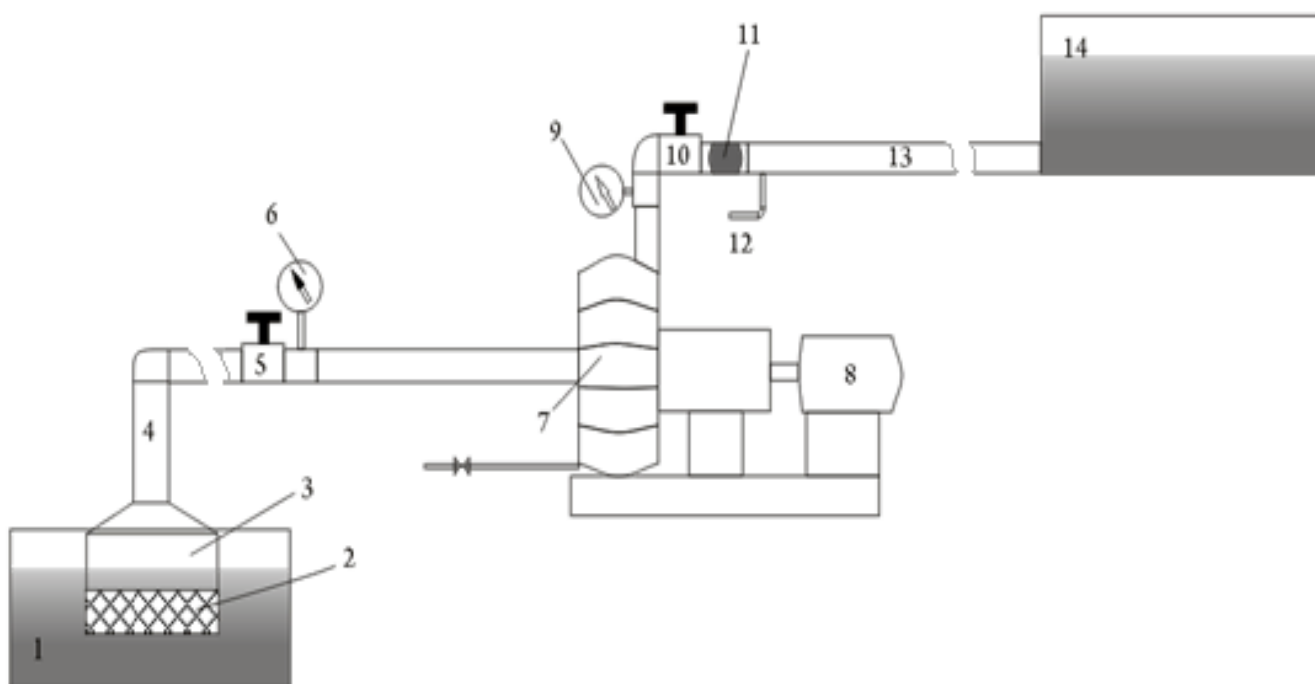


Рис. 1.1. Структура гідротранспортної системи гірничо-збагачувального підприємства

До систем транспортування породи, що використовуються всередині збагачувальних фабрик, відносяться конвеєрне транспортування і гідротранспортування рудних шламів [4].

Типова відокремлена гідротранспортна система складається з приймальних і напірних резервуарів з необхідною арматурою, трубопроводів, шламових насосів, електродвигуна, системи вимірювальних приладів, а також пристроїв, необхідних для заповнення шламових насосів рідиною перед пуском. Окрім цього, до елементів гідротранспортної системи відносяться такі елементи, як пускові пристрої електродвигуна шламового насоса і агрегати автоматичного керування роботою ШН зокрема і ВГТС в цілому. Структура відокремленої внутрішньофабричної гідротранспортної системи приведена на рис. 1.2.



1 – приймальний резервуар; 2 – приймальна сітка; 3 – приймальний зворотний клапан; 4 – втягуючий трубопровід; 5 – монтажна заслінка; 6 – вакуумметр; 7 – насос; 8 – електродвигун; 9 – манометр; 10 – регулююча заслінка; 11 – зворотний клапан; 12 – витратомір; 13 – напірний трубопровід; 14 – приймальний резервуар

Рис. 1.2. Структура гідротранспортної системи

В умовах гірничо-збагачувальних комбінатів внутрішньофабрична система гідротранспортування складається з ряду послідовних і паралельних одиничних систем.

Електроприводи на більшості гірничих комбінатів систем забезпечують енергетичну основу і автоматизацію найрізноманітніших технологічних і виробничих процесів в тому числі і для транспортування гідротранспортом. Для здійснення завдання перекачування шламових середовищ, що є одним з найбільш важливих і енергоємних завдань на підприємствах гірничої промисловості [3], застосовуються різні типи насосів. Найчастіше застосовуються відцентрові ШН [5, 6], в яких відцентрова сила, що утворюється від обертання робочого колеса, передається перекачуваному середовищу.

Опис і структуризація особливостей конструкцій насосів приведений в стандарті ДСТУ 3063-95 [7]. До технічних параметрів, що впливають на вимоги, які пред'являються до ВГТС, відносяться: протяжність трубопроводу; висота підйому пульпи і форма перерізу трубопроводу. До технологічних параметрів відносяться швидкість протікання і щільність пульпи, розмір шламових часток, коефіцієнт тертя шламу і вид перекачуваної гідросуміші, яка, у свою чергу, може бути класифікована як: колоїдна, структурна, тонкодисперсна, грубодисперсна, неоднорідна грубодисперсна [5, 6].

Найважливішими параметрами відцентрових шламових і ґрунтових насосів є розмір і геометрія робочого колеса, тип ущільнення валу і матеріал броні залежно від виду перекачуваної гідросуміші [8].

Одним з найбільш важливих критеріїв надійного гідротранспорту твердих продуктів є мінімальна швидкість подачі гідросуміші, що дозволяє уникати осаджень. Вона розраховується, виходячи в основному, з швидкості осадження твердих речовин а, отже, з мінералогічної ваги, розміру часток, їх форми і концентрації перекачуваної суміші.

Порівняно з іншими видами транспорту, гідротранспорт шламів і ґрунтів має такі конструктивні особливості: велика протяжність трубопроводів і залежність параметрів гідротранспортування від геометрії трубопроводів;

безперервний режим роботи; необхідність підтримувати певні параметри (швидкість подачі, тиск і так далі) в заданих межах; підвищена зносостійкість елементів системи гідротранспорту, зважаючи на підвищену абразивність суміші, що транспортується.

Для зниження зносу, на арматурі ВГТС зазвичай встановлюють тільки найнеобхідніші прилади, наприклад, заслінки у всмоктуючому і напірному трубопроводах для блокування зумпфа і системи трубопроводів. Перед ШН, і за ним, в трубопроводі мають бути передбачені відведення для виміру тиску, в яких для безперервних вимірів застосовуються мембранні датчики тиску [5–9].

Виходячи з аналізу процесу гідротранспортування на гірничо-збагачувальних підприємствах, можна зробити наступні висновки:

- гідротранспортні системи гірничо-збагачувальних підприємств є складною динамічною системою, що піддається дії множин зовнішніх і внутрішніх чинників, що значно ускладнює ідентифікацію стану і контроль гідротранспортної системи;

- агресивність середовища, що транспортується, призводить до зносу устаткування ВГТС і виникненню аварійних ситуацій, що суперечать одній з найважливіших вимог – безперервності роботи ВГТС, що робить завдання аналізу, виявлення та попередження аварійних і передаварійних станів одним з важливих завдань дослідження ВГТС.

1.2. Основні причини виникнення аварійних станів внутрішньофабричних гідротранспортних систем

Система гідротранспорту в умовах гірничо-збагачувальних комбінатів є безперервно працюючою системою, вплив на яку чинять як зовнішні чинники, вміст і розмір твердих зерен в рідині, щільність шламу, так і чинники внутрішнього характеру, що відносяться у своїй більшості до зносу різних вузлів і елементів системи. Події, що призводять до несправностей і відмов елементів системи гідротранспорту, носять стохастичний характер, тому визначення і

попередження їх є складним науково-технічним завданням.

Технічні несправності ВГТС, що виникають у процесі експлуатації, можуть бути розділені характером руйнівних дій на механічні, електричні, термічні, хімічні, а також їх сукупності. Причини можуть підрозділятися на експлуатаційні чинники, на помилки і недосконалість при проектуванні, виробництві або монтажі самих гідротранспортних систем. По видах руйнування несправності розділяються на: повзучість; пробої ізоляції; зміни структури під впливом температурних чинників; корозійний, молекулярний, абразивний, кавітаційний, знос і тріщини втомі матеріалу [5; 10].

Експлуатаційні дефекти, що виникають в процесі роботи ВГТС за характеристикою швидкості розвитку розділяють на два види: дефекти, що розвиваються швидко і дефекти, що розвиваються повільно. Дефекти, що розвиваються швидко, викликають раптові аварійні відмови і є дуже важко прогнозованими. Такі дефекти, як правило, є результатом виробничих технологічних дефектів (приховані тріщини, порожнини, неоднорідності), або динамічного чи статичного руйнування під дією миттєво виниклого навантаження, що перевищує межу міцності конструкції. Дефекти, що розвиваються повільно, викликають відмови, прогнозування яких легко передбачуване, і, як наслідок, такі відмови можуть бути передбачені і заздалегідь усунені. До дефектів такого роду відносяться дефекти, обумовлені корозійним, ерозійним або кавітаційним зносом. В результаті аналізу документації на шламові насоси різних фірм-виробників, а також з літературних джерел виявлені наступні типові несправності гідротранспортних систем, представлені в табл. 1.1 [10–33].

Сформована класифікація несправностей гідротранспортних систем охоплює фактично увесь спектр можливих несправностей. Проте для визначення конкретної несправності, а також її передумов, і, що, поза сумнівом важливо, наслідків аварійної ситуації, необхідно скласти класифікацію несправностей, з вказівкою причин відмов і наслідків кожної конкретної аварійної ситуації. Така класифікація складена, спираючись на метод віброакустичної діагностики,

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	З'єднання «Опора- Фундамент»				+								+	
	З'єднання «Насос- Трубопрово- ди»				+				+	+			+	
	З'єднання «Проводка- Двигун»		+	+										
	Електро- проводка	Обрив								Замикання				

Таблиця 1.2

Прояви відмов і несправностей в частотному спектрі віброакустичних сигналів
гідротранспортної системи

Причина відмови	Локалізація відмови	Прояв відмови в частотному спектрі
1	2	3
Дисбаланс	Ротора, робочого колеса, системи «Ротор електродвигуна–муфта– робоче колесо» тощо	Дисбаланс $F_{н.к.} \pm F_0$, Гц. Розцентровка валів: $F_{н.к.}$ – зміщення, $F_{в.до}$ – злам. Автоколивання ротора при збільшеному радіальному проміжку $2F_{сеп}$
Дефекти ремінних передач	Знос ремня. Послаблення натягнення. Неспіввісність шківів. Ексцентриситет шківа. Резонанс ремня тощо	Частота власних коливань гладкого ремня: $F_{з.р.} = 3,14F_0D_{ш} / L_p$, Гц. Частота власних коливань зубчастого ремня: $F_{з.р.} = F_6 Z_3$, Z_3 – кількість зубів шківа
Дефекти насоса	Кавітація. Помпаж. Зрив потоку. Поломка лопаток тощо	Частота лопатки: $F_l = F_6 Z_l$, Z_l – кількість лопаток. Зрив потоку: $F_{с.н.} = F_6 Z$; $Z = Z_l \pm 1$, Гц

Продовження табл. 1.2

1	2	3
Дефекти електро-двигунів	Нерівномірний повітряний проміжок між статором і ротором. Ушкодження обмоток статора або ізоляції. Ексцентриситет ротора. Обрив або послаблення кріплення стержнів в «білячій клітині». Послаблення кріплення обмоток статора. Перекіс напруги по фазах тощо	Друга мережева: $2F_c$, Гц. Частота ковзання: $F_{ск} = F_{син} - F_o$; $F_{син} = F_c / Z_{пол}$, $Z_{пол}$ – кількість пар полюсів. Стержнева частота: $F_{ст} = F_o Z_{ст}$, Гц, $Z_{ст}$ – кількість стержнів ротора. Полюсна частота: $F_n = F_o Z_{пол}$, Гц. Колекторна частота: $F_k = F_o Z_{кол}$, Гц, $Z_{кол}$ – кількість пластин колектора. Статичний ексцентриситет: $F_{с.е.} = F_{ст} \pm \Delta o 2F_c$, Гц. Динамічний ексцентриситет: $F_{д.е.} = F_{ст} \pm Kf_o$, Гц. Дефект «білячої клітини»: $F_{б.к.} = K_1 F_o \pm K_2 F_{ск}$, Гц. Перекіс напруги по фазах: $F_{н.ф.} = 6F_o$, Гц. Автоколивання ротора при збільшеному радіальному проміжку: $2F_{сен}$, Гц
Дефекти привідних муфт	Послаблення посадки на вал. Нерівномірна передача крутного моменту, що крутить елементами зачеплення	Розцентровка валів: $F_{н.к.}$ – зміщення, $F_{в.до}$ – злам, Гц
Нежорстке кріплення	Тріщини в рамі або корпусі. Послаблення затягування фундаментних або кріпильних болтів. «М'яка лапа»	Автоколивання ротора при збільшеному радіальному проміжку: $2F_{сен}$, Гц
Дефекти підшипників кочення	Дефекти зовнішнього кільця	Провертання кільця: F_o . Знос: $F_{н.к.}$. Перекіс: $2F_{н.к.} \Delta o F_{н.к.}$, Гц

Продовження табл. 1.2

1	2	3
Дефекти підшипників кочення	Дефекти тіл кочення, сепаратора, внутрішнього і зовнішнього кільця. Усі дефекти виготовлення, монтажу і зносу. Якість мастила	Вертикальне розташування. Дефекти тіл кочення: $До (F_0 - F_{cen}); K_1 F_{в.к.} \pm K_2 F_0, \Gamma \text{ц},$ $K_1 F_{в.до} \pm K_2 (F_0 - F_{cen}); 2K F_{т.к.}, \Gamma \text{ц},$ $До F_{cen}; K_1 F_{т.к.} \pm K_2 F_0, \Gamma \text{ц},$ $K_1 F_{т.к.} \pm K_2 (F_0 - F_{cen});$ $2K_1 F_{т.к.} \pm K_2 F_{cen}, \Gamma \text{ц},$ $2K_1 F_{т.к.} \pm K_2 F_0; K_1 F_{н.к.} \pm K_2 F_{cen},$ $\Gamma \text{ц}.$ Дефекти внутрішнього кільця: - неспіввісність валу і внутрішнього кільця F_0; - овальність $2F_0, \Gamma \text{ц};$ - гранність $KF_0, \Gamma \text{ц};$ - перекіс $2F_{в.к.}; До F_{в.к.}; До F_{в.к.} \pm F_0, \Gamma \text{ц};$ $K_1 F_{н.к.} \pm K_2 F_0; K_1 F_{н.к.} \pm K_2 (F_0 - F_{cen}), \Gamma \text{ц}.$ Дефекти зовнішнього кільця: - перекіс $2F_{н.к.}; До F_{н.к.}; До F_{н.к.} \pm F_0, \Gamma \text{ц};$ $K_1 F_{в.к.} \pm K_2 F_0 \text{ (перев. } До = 2), \Gamma \text{ц}.$ Інші: - дисбаланс $До F_{в.до}.$ Дефекти тіл кочення: $До F_{cen}; 2K F_{т.к.}; 2K_1 F_{т.к.} \pm K_2 F_{cen};$ $2K_1 F_{н.к.} \pm F_{cen}.$ Дефекти внутрішнього кільця: - неспіввісність валу і внутрішнього кільця F_0; - овальність $2F_0$; - гранність KF_0; - прослизання кільця $До F_0$ при $До > 10$; - перекіс $2F_{в.к.}; До F_{в.к.}; K_1 F_{в.к.} \pm K_2 F_0;$ $До F_{н.к.} \pm F_{cen}$

1	2	3
Неспів- вісність валів	Злам і зміщення валів. Зігнутий вал	Розцентровка валів: $F_{н.к.}$ – зміщення, $F_{в.к.}$ – злам. Проявляється на частоті обертання і гармоніках. Незначна залежність інтенсивності вібрації від навантаження. Поки муфта компенсує неспіввісність, кількість і амплітуда гармонік в прямих спектрах практично не міняються. При сильній неспіввісності кількість гармонік скорочується, росте амплітуда на частоті обертання
Дефекти зубчастих передач	Знос зуба. Поломка зуба. Ударне зачеплення. Неспіввісність валів	Частота зубчастого зачеплення: $F_z = F_g Z_z$, Гц, Z_z – кількість зубів шестерні. Знос зубів: $F_{уз} = D_o F_g$, Гц; $F_{уз} = K_1 F_z \pm K_2 F_g$
Вигин і замулю- вання трубо- проводу	Вигин і замулювання трубопроводу	$F_u = 75,8 \lambda (D/L_2)$, D – діаметр труби, L – довжина труби, λ – чинник частоти. $F_z = SV/D$, Гц, S – число Строчала, V – швидкість течії, м/с, D – діаметр перешкоди

Як приклади частотних характеристик, що описують несправності, можна привести спектрограми, представлені на рис. 1.3–1.8.

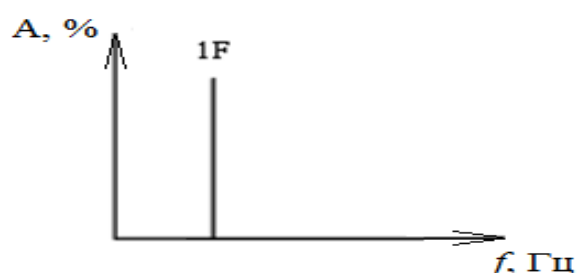


Рис. 1.3. Спектр типу А, що характеризує послаблення кріплення насосного агрегату;
 f – несуча частота обертання ротора, Гц

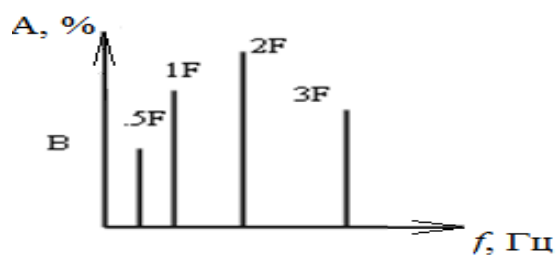


Рис. 1.4. Спектр типу В, що характеризує послаблення кріплення насосного агрегату

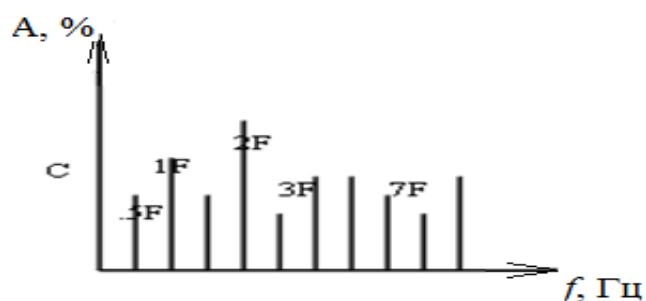


Рис. 1.5. Спектр типу С, що характеризує послаблення кріплення насосного агрегату

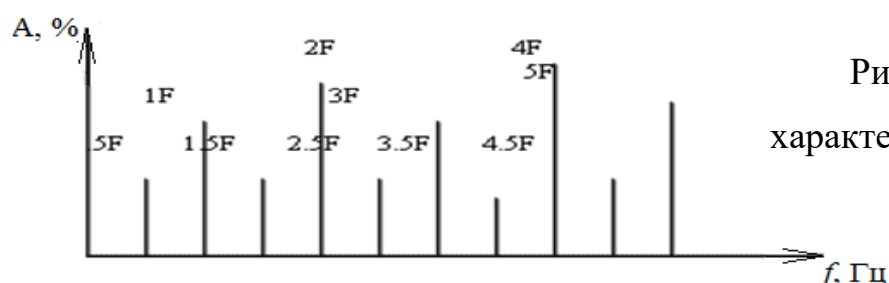


Рис. 1.6. Спектр, що характеризує торкання ротора

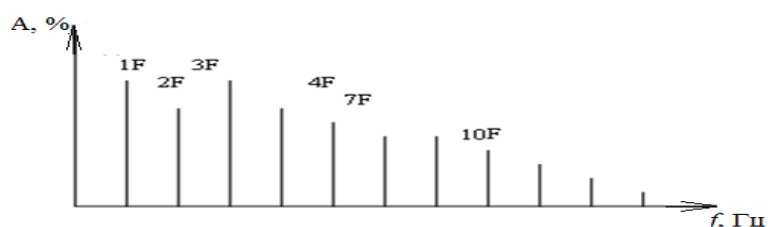


Рис. 1.7. Спектр, що характеризує знос підшипника

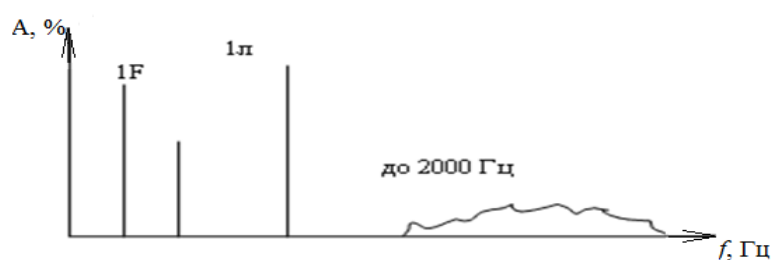


Рис. 1.8. Спектр, що характеризує кавітацію в насосі

Характерною особливістю послаблення кріплень агрегату в цілому є такі види спектрів, як: спектр А, що подано на рис. 1.3 характерний для таких структурних змін, як послаблення кріплень лап, рам або фундаменту, нежорстке кріплення на фундаменті, послаблення затягування фундаментних та/або

кріпильних болтів і лап. Аналіз фаз коливань показує, що частоти коливань у вертикальній площині лап зміщені на 180° від частоти коливань фундаменту. Спектр В, що подано на рис. 1.4, виникає внаслідок послаблення кріплень корпусів підшипників, тріщинами в рамі або фундаментах корпусів підшипників.

Спектр типу С, що подано на рис. 1.5, викликаний збільшеним проміжком в самому підшипнику або в місці його посадки на вал. Частота коливань у такому разі нестабільна і коливається в широких межах через те, що підшипник змінює своє положення на валу. Часто послаблення кріплень викликає субгармоніки на частотах, кратних $1/2$ і $1/3$ частоти обертання ротора (наприклад, $5F$, $1,5F$, $2,5F$). Торкання елементів механізму, що обертаються, з нерухомими, формує спектр, що подано на рис. 1.6. Слід зазначити, що торкання можливе по дузі або по всьому колу. Так генерується ряд частот, де фіксується один або декілька резонансних піків. Також формуються піки на частотах F , кратних $1/2$, $1/3$, $1/4$ і так далі субгармонік частоти обертання залежно від частоти власних коливань ротора.

Торкання ротора викликає множину високочастотних піків і шумів. Останні стадії зносу підшипника, представлені на рис. 1.7, характеризуються цілою серією вищих гармонік від частоти обертання. Опорні втулки з надмірним проміжком викликають невеликий дисбаланс, який є причиною сильної вібрації, яка буде значно менше, якщо привести проміжок у відповідність з розрахунковим. Кавітація викликає випадкові коливання в області високих частот, які іноді взаємодіють з частотою взаємодії лопаток ротора і статора (рис. 1.8), що може привести до значних руйнувань [34].

Аналіз причин виникнення аварійних станів, а також аналіз існуючих систем і методів контролю стану ВГТС показав, що більшість аварійних і передаварійних станів можуть бути виявлені за допомогою аналізу сигналів, що отримуються від різних засобів контролю ВГТС. Проте, існує ряд станів, які не розпізнаються існуючими методами контролю. У таких випадках моделювання процесів, що викликають аварійні ситуації ВГТС, є одним з ключових методів контролю розвитку ситуації і переходу станів процесу гідротранспорту шламів,

ведучим у результаті до попередження виникнення відмов ВГТС, що веде до завдання поглибленого аналізу існуючих математичних моделей гідротранспортних систем гірничо-збагачувальних підприємств.

1.3. Аналіз математичних моделей гідротранспортних систем гірничо-збагачувальних підприємств

Для моделювання систем гідротранспорту в цілому, і шламових насосів зокрема, нині використовуються методи математичного моделювання [5; 6; 38–44], оскільки таке моделювання є достовірнішим і менш витратним, чим натурне моделювання, а також позбавленим ряду недоліків, властивих натурному моделюванню.

Основною характеристикою трубопровідної системи є залежність тиск-подача (рис. 1.9), стабілізована в оптимальній робочій точці [5; 6]. Завданням автоматизації гідротранспортної трубопровідної системи є обчислення оптимальної робочої точки за відомих умов і підтримка роботи системи в межах допустимих відхилень від оптимуму. При цьому система керування, що розробляється, повинна виконувати, як мінімум, наступні основні завдання: підтримка роботи системи на оптимальній точці ККД $Q-H$, підтримка роботи в економічному режимі, попередження про можливі аварійні та передаварійні ситуації, відключення в екстремальних випадках.



Рис. 1.9. Розрахункові робочі точки гідротранспортної системи

Регулювання режимів роботи трубопровідного гідротранспорту в робочому стані можливо на основі: дросельного регулювання при постійній частоті обертання валу, регулювання зміною частоти обертання валу, комбінованого дросельно-частотного регулювання, регулювання перепусканням рідини [5; 6; 45; 46]. Також можливе регулювання режиму роботи шляхом зміни конструктивних елементів насоса або трубопроводу, але цей метод непридатний для швидкого і безупинного регулювання роботою комплексу. Отже, потрібна розробка регулювання роботи системи гідротранспорту так, щоб робота усієї системи лежала в допустимих межах для певного технологічного процесу і цього устаткування. Для цього необхідно прийняти ряд обмежень, що накладаються на процес регулювання гідротранспорту зовнішніми і внутрішніми чинниками. До обмежень такого роду відносяться обмеження, що накладаються: магістраллю (трубопроводом); насосом; приводним електродвигуном шламового насоса; вимогами технології; і обмеження економічного характеру [46; 47; 48].

Нині основою для усіх моделей гідротранспортних систем є модель, в якій основними величинами, що характеризують роботу ШН, є подача Q , м³/с, масова подача M , кг/с, тиск H , м, стовпа рідини, тиск P , Па, потужність двигуна N , кВт, і ККД – η .

Згідно ГОСТ 17398-72 тиск насоса визначається залежністю, яка є різницею потенційних енергій рідини в перерізі на виході і на вході в нього [16; 49].

Таким чином, повний тиск, що створюється насосом, визначається як

$$H = \frac{P_K - P_H}{\rho g} + \frac{c_K^2 - c_H^2}{2g} + (z_K - z_H), \quad (1.1)$$

де P_K – тиск на виході з насоса, Па;

P_H – тиск на вході в насос, Па;

c_K, c_H – середня швидкість потоку на вході та виході з насоса, м/с;

z_K, z_H – висота розташування центрів вихідного і вхідного перерізів насоса, м.

При цьому рівняння (1.1) не враховує втрати енергії, що відбуваються на різних ділянках роботи гідротранспортної мережі. Рівняння балансу енергій відцентрового насоса [8] розглядається як

$$A_z = \Pi_{\text{мех}} + \Pi_{\text{об}} + \Pi_{\text{гидр}} + A_k \quad (1.2)$$

де A_z – загальна робота, Дж;

$\Pi_{\text{мех}}$ – втрати механічні, Дж;

$\Pi_{\text{об}}$ – втрати об'ємні, Дж;

$\Pi_{\text{гидр}}$ – втрати гідравлічні, Дж;

A_k – корисна робота, Дж.

В даному випадку втрати об'ємні – це втрати енергії на перетікання рідини у середині насоса і протікання з насоса; втрати механічні – тертя на підшипниках, ущільненнях, на колесах і тому подібне; втрати гідравлічні – втрати енергії на подолання гідравлічних опорів всередині насоса і трубопроводу ВГТС в цілому, проте визначення кожного з параметрів цього рівняння зазвичай зводиться до емпіричних спостережень.

Формулою, що визначає залежність теоретичного тиску насоса від конструкції його робочого колеса, є рівняння Ейлера [8]

$$H_T = \frac{1}{g}(u_2 c_K \cos \alpha_2 - u_1 c_H \cos \alpha_1), \quad (1.3)$$

де $u_{1,2}$ – відносна швидкість потоку, м/с;

c_K, c_H – абсолютна швидкість потоку на виході і вході, м/с;

α_1, α_2 – кути нахилу між напрямками переносної і абсолютної швидкостей потоку.

Для визначення практичного тиску насоса необхідно вводити поправки, що враховують різного роду втрати тиску в насосі і трубопроводі, що, в умовах зміни щільності пульпи, представляє значну обчислювальну проблему.

Однією з основних причин втрат теоретичного тиску є кінцеве число лопатей насоса і втрати тиску на подолання гідравлічних опорів всередині насоса. Рівняння, яке враховує ці втрати, має вигляд [5]

$$H_T = \frac{1}{g}(u_2 c_K \eta_{\Gamma} k \cos \alpha_2) = \frac{1}{g} \left(1 + 2 \frac{\psi}{z} \cdot \frac{1}{1 - (r_1/r_2)^2}\right)^{-1} u_2 c_K \eta_{\Gamma} \cos \alpha_2, \quad (1.4)$$

де k – коефіцієнт, що враховує падіння тиску із-за кінцевого числа лопатей, який може бути обчислений формулою Проскури;

ψ – коефіцієнт, що враховує випрямляючий апарат;

z – кількість лопатей.

Проте, в реальних умовах виробничого гідротранспортування шламу рекомендується використовувати ряд математичних моделей, запропонованих для конкретних умов гідротранспорту. У цих моделях, як і в реальних трубопровідних системах, одним з основних параметрів є визначення критичних швидкостей руху рідини в трубопроводі [5; 6; 29–44; 50].

Більшість моделей сучасних систем гідротранспорту шламів заснована на моделях двофазних середовищ із сталою течією. Проте, в умовах систем великої протяжності цей підхід не є правильним, унаслідок можливих динамічних змін в щільності шламу, що поступає. В цьому випадку навантаження на ШН змінюється, що призводить до переходу до несталої течії шламу [5, 6, 29–44, 50].

У методиці розрахунку гідротранспортних установок для транспорту та намівання хвостів залізрудних ГЗКів [31, 32], для визначення критичної швидкості течії пульпи при щільності пульпи до 1250 кг/м^3 рекомендується використовувати вираження виду

$$V_{kp} = 15 \sqrt[3]{D} \cdot \sqrt[4]{w} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 0,4 \right) \cdot \Delta_0^{0,1}; \quad \rho = \frac{1}{(1-C)/\rho_0 - C/\rho_T}, \quad (1.5)$$

а при щільності великих 1250 кг/м^3 , рекомендується використовувати формулу

$$V_{кр} = 12,75 \sqrt[4]{w} \cdot \Delta_0^{0,1} \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{C} \cdot \frac{1250 - \rho_0}{\rho_T - \rho_0} \cdot \frac{\rho_T}{1250}}, \quad (1.6)$$

де $V_{кр}$ – критична швидкість гідротранспортування, м/с;

C – масова концентрація, кг/м³;

ρ_T – щільність матеріалу, що транспортується, кг/м³;

w – гідравлічна розмірність;

D – діаметр трубопроводу, м;

ρ_0 – щільність води, кг/м³.

Основні залежності критичної швидкості від великої, щільності і складу пульпи запропоновані в роботі [5]. Для гідросумішей, які містять частки величиною від 0,16 до 2 мм, була запропонована залежність

$$V_{кр} = 3,1 \cdot \sqrt{wD \sqrt{\frac{gSAr}{(1+SAr)d_{cp}}}}; i = i_0(1+SAr) + 0,3 \cdot SAr \left(\frac{w}{V}\right)^2 \frac{D}{d_{cp}}, \quad (1.7)$$

де S – об'ємна концентрація часток;

Ar – параметр Архімеда;

d_{cp} – середньозважений діаметр часток дрібної фракції, м;

w – швидкість обмеженого падіння часток, м/с;

i – гідравлічний ухил при течії пульпи, град.;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

V – середня швидкість гідросуміші, м/с.

Методики, в яких передбачений розподіл гідросуміші на класи за розміром твердих часток суміші запропоновані в роботах [6, 30]. Для кожного класу крупності була запропонована своя формула визначення критичної швидкості пульпового потоку, проте, в умовах гірничо-збагачувальних комбінатів виникають труднощі, викликані ідентифікацією класу крупності при її зміні.

Науково-дослідними інститутами РФ «ВНИИжелезобетон» та «Проектгидромеханизация», а також інститутом «Механобр» були запропоновані

свої методики розрахунку критичних швидкостей в гідротранспортних системах, а також виведені оригінальні залежності швидкостей транспортування від параметрів пульпи, що транспортується [30, 32].

Усі розглянуті вище методики і залежності відносяться до розрахунку сталої течії пульпи без урахування яких-небудь коливань потоку. Існують розрахункові залежності для несталого руху рідини в трубах; рівняння несталого руху в'язкою слабостискуваної рідини в трубах при обліку впливу нестационарності на силу тертя; розрахунки несталого течії в умовах коливання тиску та інші важливі закономірності [51]. У цій роботі розглянуті випадки залежностей для однофазної рідини, які непридатні для шламового гідротранспорту.

Для багатоступінчастих гідротранспортних мереж, що складаються з n ланок, режим роботи може бути визначений за формулами [5]

$$H = \left[\sum_{i=1}^n a_i - \frac{\rho}{\rho_0} \sum_{i=1}^{n-1} H_i \right] - \left[\sum_{i=1}^n b_i + \sum_{i=1}^{n-1} R_i \right] \cdot Q^2; \quad (1.8)$$

$$H = \frac{\rho}{\rho_0} H_n + R_n Q^2,$$

де H – тиск;

H_i – тиск в i -й ланці, Па;

R_i – коефіцієнт гідравлічних опорів в цьому ступені мережі;

Q – продуктивність гідротранспортної системи за гідросумішшю, м³/с;

a_i і b_i – коефіцієнти, відповідні напірній характеристиці насоса;

ρ і ρ_0 – щільність гідросуміші та води, відповідно, кг/м³.

Наведені вище формули є статистичними моделями трубопровідної мережі та насоса, і для реального їх застосування, необхідно знати значення експериментальних коефіцієнтів R_i , a_i і b_i , які істотно залежать від поточного стану механізму, який апіорі невідомий. Це значною мірою ускладнює використання цих моделей для діагностики стану устаткування.

При синтезі динамічних моделей напірних установок і трубопровідних мереж для представлення роботи насоса використовується [46] аперіодична ланка першого порядку з передавальною функцією виду

$$W(s) = \frac{k_{n,y}}{T_y s + 1}, \quad (1.9)$$

де $k_{n,y}$ – передавальний коефіцієнт;

T_y – постійна часу напірної установки з асинхронним електродвигуном, проте, така модель є дуже спрощеною і такою, що не враховує стан окремих елементів системи «насос-двигун».

Із застосуванням ряду допущень [52, 53], динаміка переміщення гідросуміші в трубопроводі може бути виражена системою диференціальних рівнянь учасних похідних першого порядку

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} &= p \left(\frac{\partial u}{\partial t} + 2a'u \right); \\ -\frac{\partial p}{\partial t} &= pc^2 \frac{\partial u}{\partial x}, \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

де p – середній тиск в перерізі трубопроводу, Па;

u – середня в перерізі швидкість руху гідросуміші, м/с;

c – швидкість поширення обурення в гідросуміші, м/с;

$2a'$ – коефіцієнт опору трубопроводу при русі гідросуміші.

Операторна форма представлення диференціальних рівнянь методу ланцюгових дробів [42, 43, 59], дозволяє відобразити електромеханічну конструкцію шламового насоса, а також вносити до моделі зміни в процесі роботи шляхом зміни та перерахунку ланок рівняння. Основною розрахунковою формулою для певних моментів інерції є наступне вираження

$$J_k = \sum_{i=1}^N J_i = \sum_{i=1}^N \left(\frac{n_i}{n_\sigma} \right)^2 J_i^0 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{n_i}{n_\sigma} \right)^2 \frac{\pi \rho}{32g} \sum_{j=1}^{m_i} D_j^4 l_j, \quad (1.11)$$

де J_k – приведений момент інерції k -ї ділянки;

N – число східців швидкості на k -й ділянці;

n_i – частота обертання i -го ступеня, рад/с;

n_σ – частота обертання базового валу (валу двигуна), рад/с;

m_i – число елементів ділянки, що обертається з однаковою швидкістю;

J_i^0 – момент інерції i -ї групи m_i елементів відносно власної осі обертання, кг·м²;

J_i – момент інерції тієї ж i -ї групи, кг·м²;

D_j і l_j – відповідно діаметр і довжина j -го елемента, м;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

ρ – щільність матеріалу, кг/м³.

Для обчислення приведеної податливості ділянки валопровода між зосередженими масами необхідно вирахувати суму алгебраїчної податливості елементів, тобто суму розташованих послідовно елементів механізму та передавальних моментів, що крутять, від однієї маси до іншої. Податливість з'єднань вираховується за формулою

$$e_k = \sum_{i=1}^N \left(\frac{n_\sigma}{n_i} \right)^2 \frac{32}{\pi G_p} \sum_{j=1}^{m_i} \frac{l_j}{D_j^4 - d_j^4}, \quad (1.12)$$

де e_k – приведена податливість k -ї ділянки;

D_j і d_j – відповідно зовнішній і внутрішній діаметри j -го елемента, м;

G_p – модуль пружності при зрушенні, Н/м.

Стан робочого колеса шламового насоса можливо представити у вигляді ротора Джеффкотта-Лавалля (рис. 1.10) [54]. Застосувавши цю концепцію до

шламових насосів, а також ґрунтуючись на моделях [41, 42], запропоновано вважати шламовий насос багатомасовою системою роторів Джеффкотта-Лаваля.

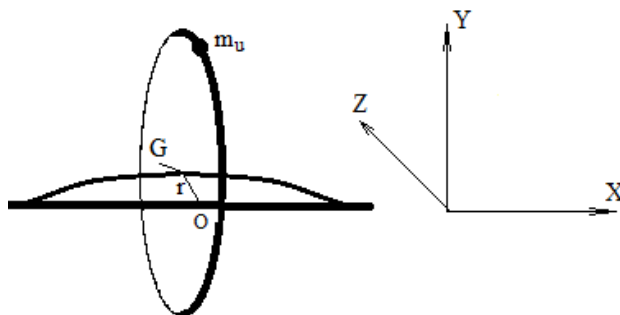


Рис. 1.10. Ротор Джеффкотта-Лаваля

На практиці широко поширений емпіричний підхід до описів математичних моделей систем гідротранспорту, оскільки він спочатку простіший та орієнтований на конкретну систему гідротранспортування. Такий підхід до побудови моделі руху багатофазного середовища в трубопроводі залежить від технологічної схеми гідротранспортної мережі, і заснований на застосуванні законів гідравліки і гідромеханіки, стосовно експериментально виявлених закономірностей. У промислових умовах часто нехтують експериментальною перевіркою і перерахунком статистичних коефіцієнтів, користуючись такими, приведеними в роботах за іншими технологічними схемами, що дуже знижує точність отриманої моделі.

У роботах [55, 56] приведені методи розрахунку граничних і оптимальних режимів роботи шламових насосів при керування системою гідротранспортування. У них також обґрунтовані допустимі діапазони зміни параметрів установки шляхом зміни частоти обертання робочого колеса, яка може бути визначена за формулою

$$\tilde{n}_i = \frac{(\chi_i a_P^i + z) Q_P^2 + \rho_* \Delta H_g}{\sqrt{\chi_i^2 b_P^{i2} Q_P^2 + 4 \chi_i c_P^i [(\chi_i a_P^i + z) Q_P^2 + \rho_* \Delta H_g]} - \chi_i b_P^i Q_P} \cdot \frac{2Q'}{Q_P} n_i', \quad (1.13)$$

де i – порядковий номер насоса;

Q_P – подача після зміни частоти обертання, м³/с;

Q' – подача до зміни частоти обертання, м³/с;

H_g – тиск насосів на бустерній станції перед гідромоніторами, Па;

a_P, b_P, c_P – коефіцієнти апроксимації витратно-напірної характеристики насоса на пульпі;

n' – первинне значення частоти обертання робочого колеса насоса, рад/с;

z – гідравлічний опір трубопроводу, Па;

ρ^* – ефективна щільність пульпи, кг/м³;

χ – коефіцієнт, що враховує зміну тиску насоса при перекачуванні пульпи.

Крім того, використання методів і алгоритмів аналізу діапазонів зміни параметрів гідротранспортних комплексів з урахуванням характеристик насоса і електродвигуна дозволяє вибирати режими роботи насосних установок, що задовольняють технічним специфікаціям. Обмеження параметрів електродвигуна при зміні частоти обертання робочого колеса насоса можуть бути виражені у вигляді рівнянь [55, 56]

$$\begin{aligned} Q'^2 + \frac{b'_P}{z' + a'_P} Q' - \frac{c'_P - \rho^* \Delta H'_g}{z' + a'_P} &= 0; \\ Q^2 + \frac{b_P}{z + a_P} Q - \frac{c_P - \rho^* \Delta H_g}{z + a_P} &= 0. \end{aligned} \quad (1.14)$$

При усіх позитивних моментах використання цієї моделі, вона також не враховує поелементний знос елементів системи гідротранспорту.

Одним з напрямів моделювання систем гідротранспортування як об'єктів автоматизації є моделі, засновані на експертних оцінках і нечіткій логіці. На основі бази знань, визначених експертом, були сформульовані логічні правила опису роботи ШН, за допомогою яких процедури логічного висновку визначали значення вихідних параметрів. Розроблена модель ШН для гідросуміші включає сім рівнів нечітких параметрів і сорок дев'ять локальних правил, виражених кон'юнкціями вхідних нечітких параметрів. Перехід від чітких параметрів до

нечітких і назад здійснюється запропонованими в цій роботі функціями фазифікації і дефазифікації [39].

У результаті аналізу системоутворюючих моделей сучасних гідротранспортних систем, можна зробити висновок, що розглянуті вище моделі функціонування трубопровідних систем не враховують таких важливих при гідротранспортуванні пульпи параметрів, як динамічної зміни щільності рудної пульпи, наявності несталості течії в трубопроводі і зв'язку між роботою приводного електродвигуна насоса і рухом пульпи в трубопроводі. Проведені дослідження показують теоретичну можливість контролю стану системи гідротранспорту за показниками СМАП приводного двигуна шламового насоса як основний параметр. Таким чином, встановлена необхідність розробки теоретичної моделі системи гідротранспорту гірничо-збагачувальних підприємств, як об'єкту автоматизації, що припускає облік зносу системи в процесі функціонування, і заснованою на принципі динамічного контролю її основних технологічних параметрів. Також для підтвердження коректності розробленої моделі, необхідно провести експериментальні дослідження системи гідротранспортування гірничо-збагачувального підприємства і виконати аналіз адекватності розробленої теоретичної моделі експериментальним даним.

1.4. Аналіз методів і систем автоматизованого діагностування та керування внутрішньофабричним гідротранспортом

У сучасних джерелах відзначається, що технологічний процес гідротранспортування вимагає саме автоматизованого керування, проте при цьому питанням розробки системи підтримки ухвалення рішень для систем гідротранспорту в цих джерелах не приділялося достатньої уваги, що робить актуальним завдання побудови системи для цих потреб [9, 10, 39–41, 44–57].

Методи ідентифікації в умовах процесів збагачувальної технології характеризуються великою різноманітністю підходів, що дозволяє застосовувати різні підходи до одного явища, що має на меті уточнення моделі [58, 59].

Методи діагностування гідротранспортних систем нині можна розділити на такі категорії:

1. Діагностика за параметрами робочих процесів [40, 60–73]: подачі, тиску, споживаній потужності, ККД, величині крутного моменту, змішаних, заснованих на аналізі декількох параметрів.

2. Вібраційно-акустична діагностика.

3. Температурна діагностика.

Опис функціонування систем гідротранспорту зводиться до двох основних класів математичних моделей [5, 38, 56, 73]: теоретичним і емпіричним моделям.

Внутрішня структура систем діагностування зазвичай є складним математичним апаратом, заснованим на моделі, який різними методами обробляє поточні технологічні дані і виробляє висновок про стан системи. У основі систем обробки сигналів лежать методи математичної обробки сигналів, такі як лінійна і адаптивна фільтрація, спектральний і частотно-часовий аналіз, нелінійна обробка, згортка і так далі [74–82]. У деяких випадках застосовуються методи, близькі до методів штучного інтелекту, такі як нечіткі моделі, нейронні мережі, експертні системи, методи розпізнавання образів [83–93].

На сьогодні до апробованих систем діагностування ВГТС можна віднести:

- систему оперативного контролю [46];
- модифіковану систему оперативного контролю [44];
- систему динамічної ідентифікації гірничих машин [94];
- систему керування і контролю «Гідротехнолог» [95, 96].

У зв'язку з описаними вимогами до АСКТП [71, 97–100], основне функціональне їх призначення повинне включати: збір і надання диспетчерові оперативної інформації про стан трубопроводу; оперативне керування технологічним процесом транспортування продукту; здійснення постійного контролю та аварійних блокувань при діагностуванні аварійних ситуацій; збір даних для роботи системи виявлення витоків в трубопроводі; накопичення і архівація інформації про роботу трубопроводу в БД для наступного використання в розрахунково-аналітичних завданнях і формуванні звітної

документації; можливість вбудовування в АСУ підприємства [97–100]. Проте, без відповідної модифікації цієї АСКТП застосування її до транспортування гідросумішей залишається проблематичним, оскільки в даному комплексі трубопроводи розглянуті як об'єкт з малою деталізацією.

Діагностика гідротранспортного комплексу, описана в роботі [56], проводилася з метою визначення параметрів роботи в регламентованих режимах. Ці виміри проводилися щомісячно, а потім дані вимірів оброблялися за методикою Є.В. Семененко [56, 65, 66], що дозволяє набути значень об'ємної витрати твердого матеріалу та води, істинній і витратній концентрації пульпи та показники гомогенності потоку.

Для автоматизації роботи гідротранспортної системи запропонована оптимізація та керування тиском при входних змінних «Щільність» і «Витрата» [39]. Інтерпретація вихідного параметра «Тиск» визначається як

$$H^* = \frac{\sum_{I=1}^{2^n} h_I^* \mu_I}{\sum_{I=1}^{2^n} \mu_I}, \quad (1.15)$$

де H^* – значення тиску, ШН, що розвивається, виражене в числовій формі;

n – кількість використовуваних лінгвістичних змінних;

h_I^* – значення нечітких змінних;

μ_I – відповідні функції приналежності.

Така модель дозволяє реалізувати нелінійну характеристику вхід-вихід об'єкту на підставі експертної інформації, з використанням неповних емпіричних даних. Діагностика гідротранспортного комплексу, описана в роботі [56], проводилася з метою визначення параметрів роботи в регламентованих режимах. Ці виміри проводилися щомісячно, а потім дані вимірів оброблялися за методикою [65, 66], що дозволяє набути значень об'ємної витрати твердого і води, істинній і витратній концентрації пульпи, а також – значення показників

гомогенності потоку. Проте, ця методика практично не розглядає знос устаткування та діагностику стану системи гідротранспортування.

АСКТП, розроблена ТОВ «Інтма» [101], включає керування гідроциклонно-насосним комплексом, в якому використані вимір і стабілізація щільності пульпи на сливі гідроциклонів; вимір і стабілізація рівня пульпи в зумпфі; автоматизоване керування перетворювачами частоти і електричними приводами замочно-регулюючої арматури; розрахунок вторинних параметрів; діагностика працездатності компонентів і вузлів установки з можливістю виявлення та реєстрації відмов і несправностей. При цьому, методи контролю стану об'єкта не передбачають керування в умовах невизначеності інформації, а також не розглядають зносу системи.

Більшість АСКТП використовують комбіновану систему регуляції, як найбільш гнучку і надійну [102, 103]. Регулювання ШН виконується або шляхом зміни частоти електричної напруги, що подається, або застосуванням регульованого приводу насосів [104–119]. Висока гнучкість досягається завдяки використанню ШН з регульованим числом обертів [120, 121]. Ця система містить ряд керівних правил, які змінюються і доповнюються новими в процесі функціонування. Проте, така система з великою часткою вірогідності дасть невірну команду, зіткнувшись з раніше незапротоколюваною ситуацією.

Система керування гідротранспортною системою в більшості випадків є однією з підсистем АСК збагачувальної фабрики [122], яка дозволяє керувати ВГТС у зв'язку з процесами, що протікають на цьому підприємстві. При цьому, діагностика та попередження аварійних ситуацій в даній АСК реалізовано за залишковим принципом.

АСКТП, розроблена ВАТ «Промавтоматика» [123–125] із застосуванням програмованого контролера, призначена для автономного керування роботою насосної станції. Інститутом Біологічного Приладобудування РАН розроблена система АСК [126], що використовується для керування насосами шляхом перетворення частоти електроенергії, що подається.

Науково-виробничою компанією «ЮгЦветМетАвтоматика» розроблено ряд АСКТП [127], що використовують у своїй роботі методи розпізнавання образів, що базуються на формулі Байеса. Для оптимізації технологічних процесів з випадковими відхиленнями параметрів від значень, заданих технологічним режимом, були використані методи адаптаційної оптимізації, основною перевагою яких є їх замкнутість за процесом, проте без урахування в них зносу устаткування.

Експлуатації АСУ насосних станцій на підприємстві «МТС» [128] показала, що впровадження регульованого електроприводу з системою контролю і керування дозволило полегшити роботу диспетчера з керуванням насосними станціями, що дало позитивний економічний ефект, який склав 30–35 %.

В результаті обробки матеріалів з автоматичного керування системами гідротранспорту гірничо-збагачувальних комплексів можна зробити висновок про відсутність адаптивних засобів в АСК гідротранспортних систем, що ставить такі завдання наукового дослідження, як розробка алгоритмів діагностики стану систем гідротранспортування із застосуванням методів розпізнавання та елементів штучного інтелекту на основі отриманих теоретичних і експериментальних даних; розробки методів формування робочих режимів в адаптивній системі керування в умовах неповної та нечіткої інформації про об'єкт керування шляхом адаптації моделі під поточні умови функціонування; обґрунтування функціонування системи підтримки ухвалення керуючих рішень внутрішньофабричного гідротранспорту, для реалізації розроблених алгоритмів контролю і діагностики.

Висновки до розділу 1

Аналіз методів і систем діагностування і керування гідротранспортом гірничо-збагачувальних підприємств показав, що в розглянутих раніше підходах до керування та контролю системами гідротранспортування на гірничо-збагачувальних підприємствах не вирішені проблеми, пов'язані зі зносом

устаткування, межами експлуатаційних можливостей безаварійного функціонування, діагностуванням поточного стану системи гідротранспорту в цілому, а також окремих її елементів. Таким чином, метою подальших досліджень є підвищення ефективності роботи внутрішньофабричного гідротранспортування шляхом розробки інтелектуальної системи підтримки ухвалення керуючих рішень, для гідротранспорту гірничо-збагачувальних підприємств, заснованих на контролі споживаної миттєвої активної потужності приводного двигуна шламового насоса.

Ідея роботи полягає в оперативній оцінці стану процесу гідротранспортування та попередженні розвитку передаварійних і аварійних ситуацій у системах гідротранспорту гірничо-збагачувальних підприємств шляхом контролю її стану як методами розпізнавання, так і методами штучного інтелекту і підтримки ухвалення керуючих рішень, за рахунок чого знижується час простоїв і підвищується продуктивність роботи ВГТС.

Для досягнення поставленої мети потрібне рішення таких завдань:

- розробити теоретичну модель системи гідротранспорту збагачувальних підприємств, яка допускає облік зносу системи в процесі функціонування;
- провести експериментальні дослідження системи гідротранспортування гірничо-збагачувального підприємства та виконати аналіз адекватності розробленої теоретичної моделі експериментальним даним;
- розробити алгоритми контролю та діагностики стану систем гідротранспортування із застосуванням методів розпізнавання та елементів штучного інтелекту на основі отриманих теоретичних і експериментальних даних;
- розробити методику формування робочих режимів системи гідротранспортування в умовах неповної і нечіткої інформації про об'єкт керування шляхом адаптації моделі під поточні умови функціонування;
- обґрунтувати функціонування системи підтримки ухвалення керуючих рішень внутрішньофабричного гідротранспорту, для реалізації розроблених алгоритмів контролю та діагностики.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ І ДІАГНОСТИКА СТАНУ ПРОЦЕСУ ВНУТРІШНЬОФАБРИЧНОГО ГІДРОТРАНСПОРТУВАННЯ

2.1. Моделювання електромеханічної системи внутрішньофабричного гідротранспорту

Виходячи з праць [128–131] можна зробити висновок, що результати енергодіагностики шламового насоса корелюють із результатами вібродіагностики цього агрегату. Також, наявність відомостей про механічні параметри механізму шламового насоса дає уявлення про спектр потужності споживаної електродвигуном цього агрегату. Спектр споживаної потужності, побудований за результатами моделювання на основі механічних характеристик, буде варіантом спектру цього агрегату, що ідеалізується, тобто він не враховуватиме міру зносу елементів гірничого агрегату, що підкоряється законам вірогідності.

Таким чином, для діагностики шламового насоса, що проводяться зараз за результатами вібраційної діагностики буде досить відомостей про механічні параметри насоса і показників СМАП електродвигуна шламового насоса. Оскільки контроль стану гідротранспортної системи за показниками ватметрографії не вимагає установки додаткових датчиків і забезпечується стандартними датчиками споживаного струму, то така система контролю є економічнішою та технічно доцільною.

Як показано в роботах [41, 42, 54], стан робочого колеса шламового насоса можливо представити у вигляді ротора Джеффкотта-Лавалю. Тоді допустимо вважати шламовий насос багатомасовою системою роторів Джеффкотта-Лавалю.

Керування ВГТС здійснюється на обмеження критичної швидкості обертання. Тоді недемпфована критична швидкість та відносне демпфування будуть виражені таким чином

$$\begin{aligned}
 \omega_k &= \sqrt{\frac{k_0}{m}} \\
 \zeta &= \frac{c}{2\sqrt{km}} \\
 \varepsilon &= \frac{m_u r_u}{m}.
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

де m – маса ротора, кг;

c – коефіцієнт демпфування;

k_0 – коефіцієнт жорсткості, Н/м;

m_u – незбалансована маса, кг;

r_u – відстань від центра диска до центру мас, м;

ω_k – швидкість обертання, рад/с.

Для шламового насоса моделі 5-Грк8 виходячи з технологічних параметрів механізму, визначається: $\varepsilon=1$; $\zeta=0,05$, а критична кутова швидкість обертання ротора приводного електродвигуна 5AM315S4 даної моделі дорівнює 25 обертів за секунду

$$\omega_k = 2\pi \cdot 25 . \tag{2.2}$$

Незбалансована реакція може бути сформульована, як функція від частоти обертання

$$G(s) = \frac{\varepsilon \omega^2}{s^2 + 2s\zeta\omega_k + \omega^2}. \tag{2.3}$$

На рис. 2.1 показано реакцію моделі ротора приводного електродвигуна шламового насоса на ступінчасту дію, подану на 1-й секунді.

У результаті аналізу графіка перехідної функції моделі ротора виявлено, що відгук системи носить характер затухаючих коливань, як і очікувалося при коефіцієнті демпфування 0,05.

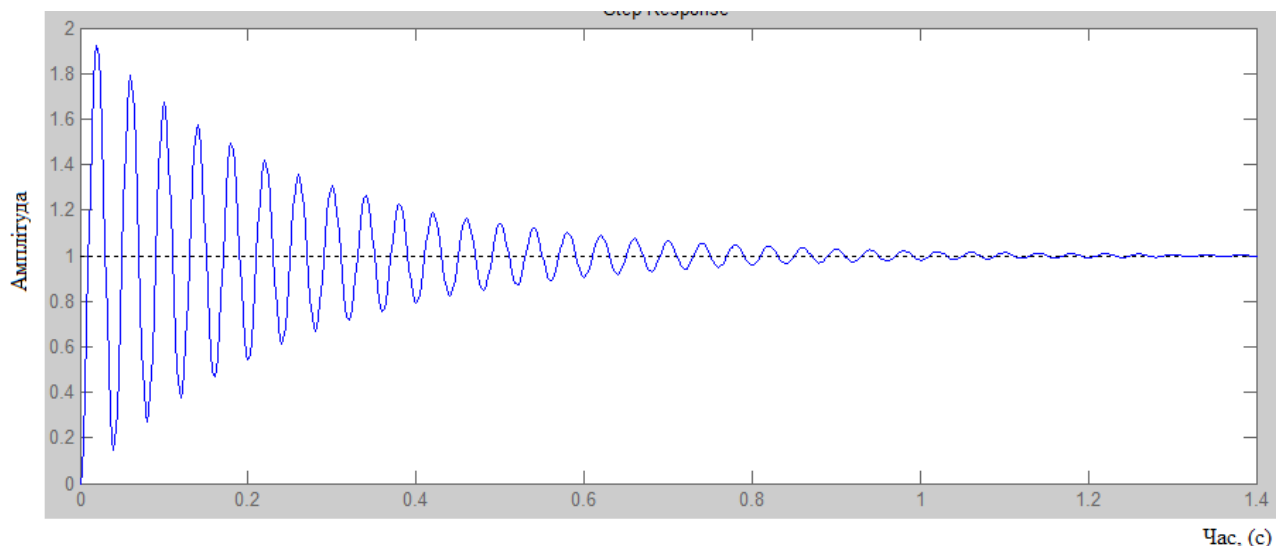


Рис. 2.1. Перехідна функція моделі ротора приводного електродвигуна шламового насоса на ступінчасту дію

Для представлення шламового насоса у вигляді системи роторів Джеффкотта-Лавалля вважається, що кожен рухомий елемент механізму представлений у вигляді ротора Джеффкотта-Лавалля, з'єднаного з сусідніми елементами пружним з'єднанням. Тоді, структурну схему моделі шламового насоса, вираженої у вигляді багатомасової системи роторів без урахування приводного електродвигуна і валу можна показати у вигляді схеми, що представлена на рис. 2.2. Моделювання системи, що складається з таких елементів, як робоче колесо шламового насоса та підшипника з 12-а роликами, п'ять з яких відцентровані, було виконано в системі Simulink, що входить в пакет математичного моделювання MATLAB.

Передавальна функція конструктивної системи шламового насоса, наведеної на рис. 2.2, є вираз

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)}, \quad (2.3)$$

де

$$N(s) = 6,1 \cdot 10^{10} s^6 + 1,7 \cdot 10^{12} s^5 + 1,1 \cdot 10^{17} s^4 + 2,1 \cdot 10^{18} s^3 + 6,91 \cdot 10^{22} s^2 + 6,5 \cdot 10^{23} s + 1,4 \cdot 10^{28};$$

$$D(s) = s^{10} + 47,12 s^9 + 2,5 \cdot 10^6 s^8 + 9,4 \cdot 10^7 s^7 + 2,3 \cdot 10^{12} s^6 + 6,6 \cdot 10^{13} s^5 + 9,9 \cdot 10^{17} s^4 + 1,9 \cdot 10^{19} s^3 + 1,7 \cdot 10^{23} s^2 + 1,6 \cdot 10^{24} s + 3,6 \cdot 10^{27}.$$

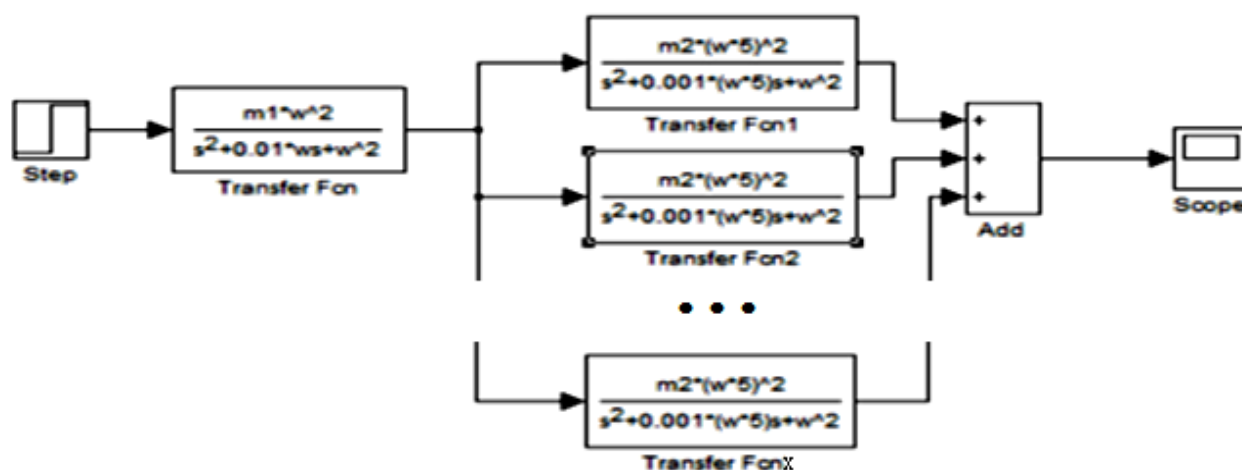


Рис. 2.2. Структурна схема шламового насоса 5-ГРК8

На рис. 2.3 наведено реакцію моделі шламового насоса 5-ГРК8 (рис. 2.2) на ступінчасту дію, яка є високо коливальною.

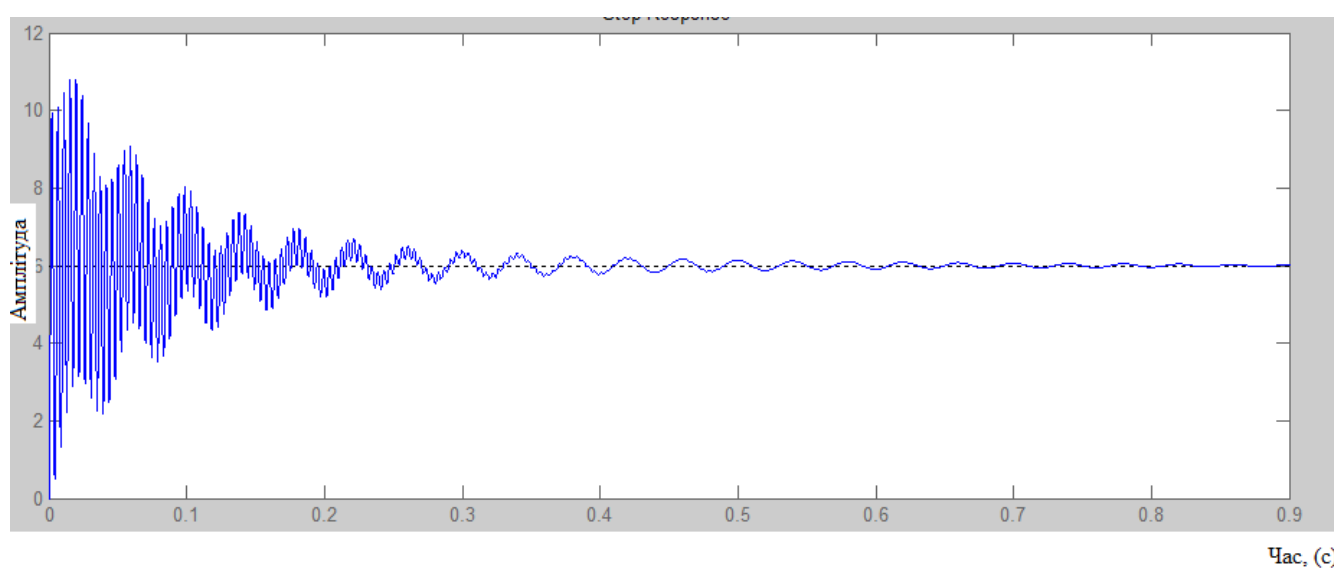


Рис. 2.3. Перехідний процес моделі насоса на ступінчасту дію

Для отримання моделі гідротранспортної системи до моделі насоса послідовно додаються ланки (рис. 2.2), що моделюють взаємодії насоса з пульпою і з трубопроводом (рис. 2.4).

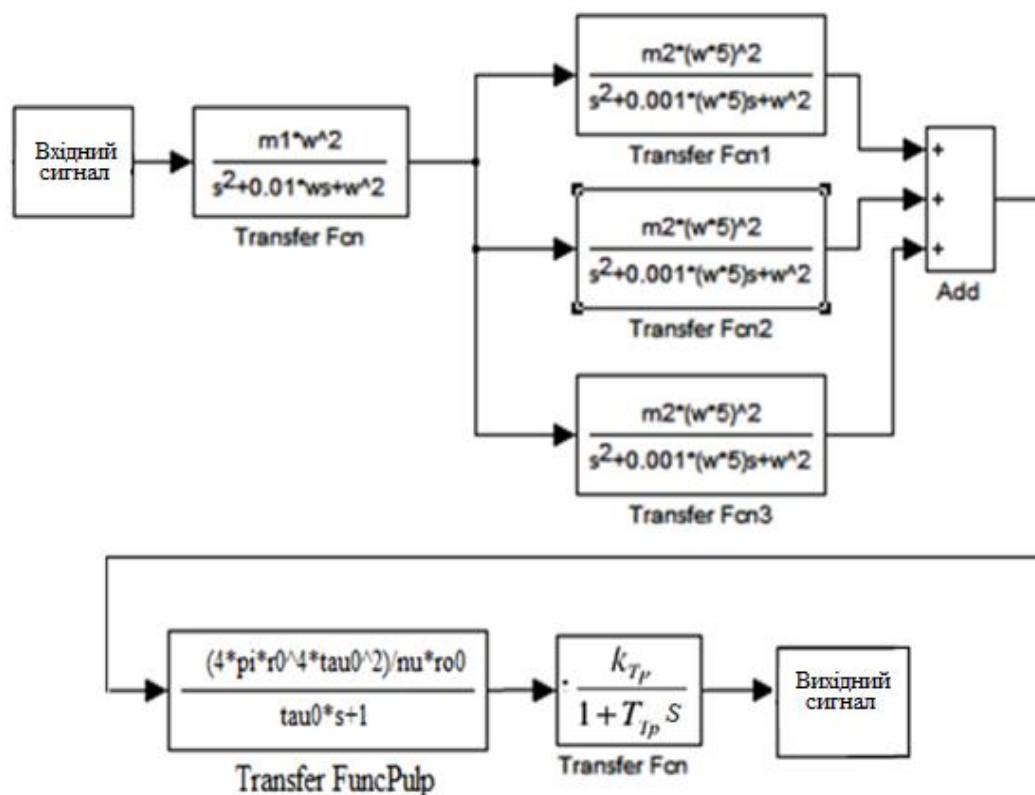


Рис. 2.4. Комп'ютерна модель одиничної гідротранспортної системи ділянки флотації другої збагачувальної фабрики Полтавського ГЗКа

Додана в систему ланка, що моделює взаємодію насоса з пульпою, дозволяє отримати такі дані за логарифмічною амплітудно-фазовою частотною характеристикою (ЛАФЧХ) для шламового насоса, заповненого пульпою (рис. 2.5). Внесення до отриманої системи ланки, що моделює взаємодію насоса з трубопроводом, по якому транспортується пульпа, отримаємо такі дані з ЛАФЧХ для ВГТС (рис. 2.6). Дослідження ЛАЧХ і ЛФЧХ виробляється за лінійними моделями системи автоматичного регулювання (САР), розроблених в «MATLAB Simulink».

Таким чином, у розділі запропонована модель ВГТС, що використовує метод лінійних елементів і заснована на застосуванні багатомасової моделі роторів Джеффкотта-Лавалю, яка дозволяє моделювати знос устаткування, який в

цій моделі передбачений через зміну коефіцієнтів передавальних функцій окремих ланок. Це, на відміну від раніше запропонованих методів діагностики систем гідротранспорту, дозволяє проводити динамічне підлаштування моделі під зміни параметрів системи в результаті некритичного зносу устаткування.

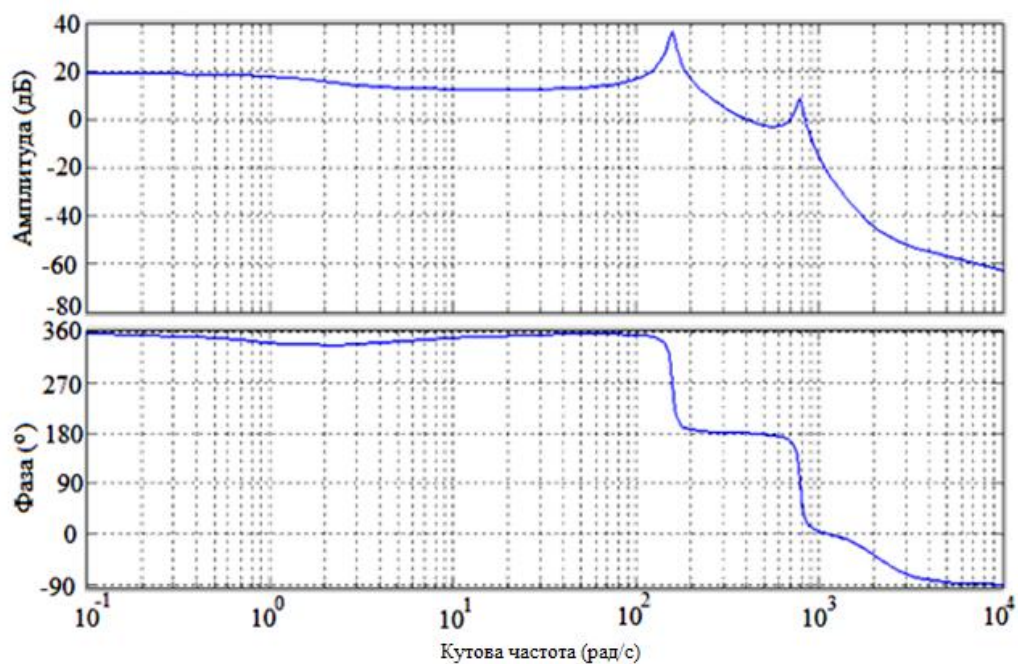


Рис. 2.5. ЛАФЧХ для насоса 5-Грк8 з пульпою

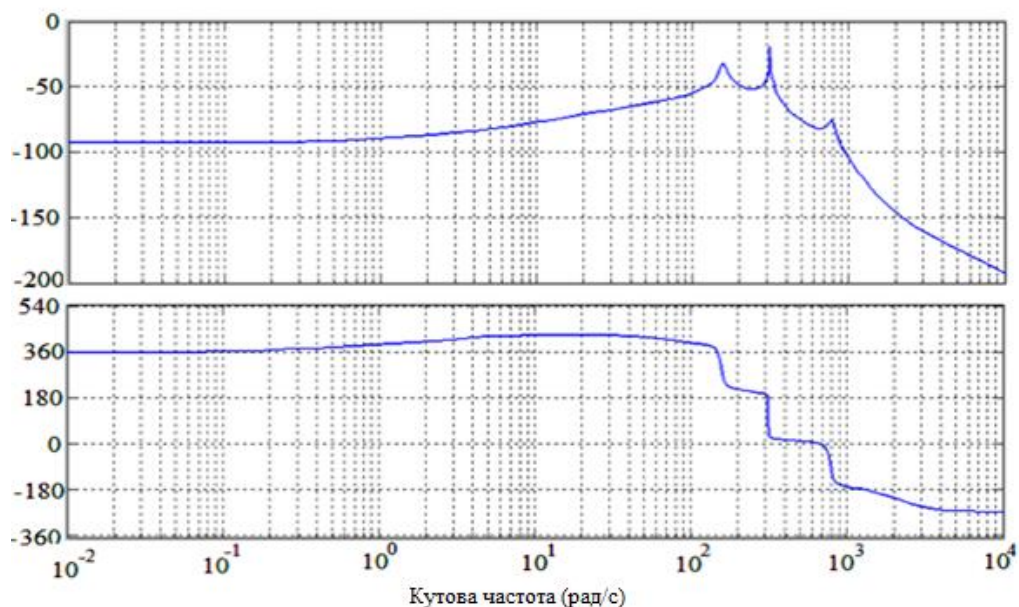


Рис. 2.6. ЛАФЧХ для ВГТС ділянки флотації другої збагачувальної фабрики
Полтавського ГЗКа

Для більш детального аналізу технологічного процесу гідротранспортування надалі є бажаним розгляд конкуруючої моделі, з метою уточнення параметрів ВГТС.

2.2. Формування математичної моделі електромеханічної системи шламового насоса

Для визначення найбільш раціонального режиму роботи системи гідротранспорту необхідно виконати аналіз існуючих нині моделей роботи гідротранспорту. При дослідженнях динаміки елементів трубопровідного транспорту важливо достовірно описати поведінку об'єкту в конкретних технологічних режимах. При цьому необхідно враховувати, що гідротранспортна система є складним стохастичним об'єктом із-за різнохарактерності технологічних процесів, що відбуваються в ній, зокрема гідродинамічних, теплових і масообмінних. Математичне моделювання динаміки трубопровідних систем повинне включати: розрахунки експлуатаційних режимів, у тому числі і несталих, при нормальному режимі роботи; здійснювати аналіз можливих аварійних і передаварійних ситуацій, пов'язаних з відхиленням від нормальних режимів експлуатації. Для оцінки поведінки системи в цих режимах необхідно заздалегідь змодельовати усі можливі варіанти її станів, що дозволить істотно прискорити визначення поточного стану системи, що, у свою чергу, дасть можливість якіснішого аналізу розвитку ситуації. У зв'язку з цим представляється перспективним створення математичної моделі трубопровідного гідротранспорту, що враховує раніше не розглянуті аспекти гідротранспортування шламів, такі як створення моделі, що враховує несталий рух пульпи, облік зносу системи гідротранспорту і залежність від енергоінформаційних сигналів гідротранспортної системи від її загального стану, а також можливість підстроювання моделі в процесі експлуатації.

Враховуючи роботи [133, 134], можна зробити висновок, що найбільш перспективним для вище описаних цілей є метод ланцюгових дробів, який

дозволяє відобразити в операторній формі електромеханічну конструкцію шламового насоса, а також вносити до моделі зміни в процесі роботи шляхом зміни і перерахунку складових ланок рівняння.

Силове устаткування напірної гідротранспортної системи включає насоси, спеціально призначені для перекачування багатофазних середовищ; допоміжні насоси, що подають на вхід гідротранспортної системи робочу рідину; електродвигуни насосів.

Динамічна модель електромеханічної системи шламового насоса визначається у вигляді еквівалентної схеми, яка складається з елементів, що ідеалізуються: зосереджених мас і безінертних пружних з'єднань [135]. Значення параметрів цих елементів і схема їх з'єднань однозначно визначає динамічні властивості формованої моделі.

Для складання еквівалентної схеми електромеханічної системи необхідно знати розміри та маси усіх її елементів. Усі дані такого роду містяться в документації на конкретний агрегат або систему, що надається заводом-виробником. У загальному випадку для гідротранспортної системи може бути складена функціонально-структурна схема, від якої легко перейти до побудови динамічної моделі об'єкту. Така схема містить укрупнені вузли системи; взаємодії між ними, показані у вигляді стрілок (рис. 2.7).

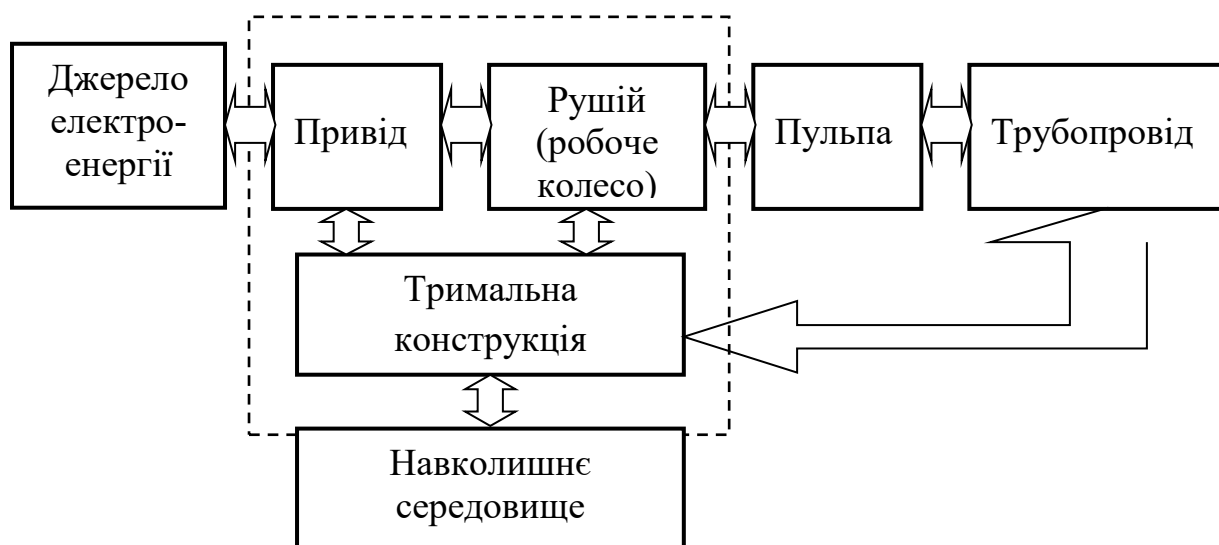
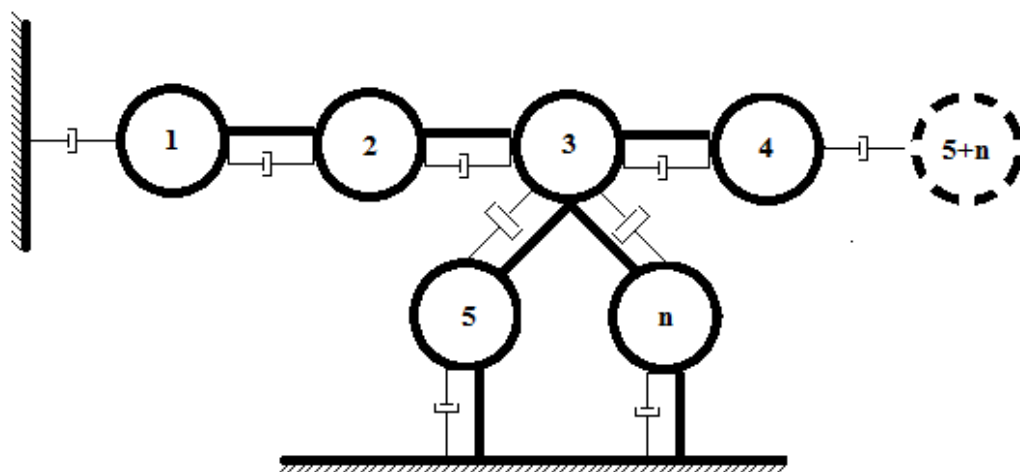


Рис. 2.7. Функціонально-структурна схема системи гідротранспортування

Існує декілька припущень відносно моделі агрегату: усі елементи діляться на зосереджені маси і безінерційні пружні з'єднання. Крім того, передбачається, що усі з'єднання в створюваній математичній моделі механізму мають один ступінь свободи [135].

В результаті дослідження конструктивних характеристик шламового насоса 5-ГРк8, формується схема взаємодії його рухомих елементів, представлена, на рис. 2.8. Взявши модель, зображену на рис. 2.7, як базову, визначимо параметри динамічної моделі приводного електродвигуна за паспортними даними гірничого агрегату [135]; при цьому конструктивні елементи ШН беруться як однорідні циліндричні елементи, співвісні з осями обертання.



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. 2.8. Схема динамічної моделі шламового насоса

У табл. 2.1 наведено параметри динамічної моделі шламового насоса 5-ГРк8, що зображена на рис. 2.4, які розраховані за формулами (1.11) і (1.12), і наведеним в [38, 135], а також виходячи з паспортних даних ШН, що наведені в технічному описі насоса 5-ГРк8.

Таблиця 2.1

Параметри динамічної моделі шламового насоса 5-ГРк8

Номер маси відповідно позначенню на рисунок	Коефіцієнт інерції m	Піддатливість E	Жорсткість k_d	Примітка
1	0,688	1	980	Ротор
2	1,455	3,586	0,5	Муфта
3	0,126	2,367	52	Вал
4	28,531	9,467	0,24	Робоче колесо
5–24	1,644	2,879	0,1	Ролики підшипників
25	23,34	0,023	0,021	Пульпа

З використанням приведених даних, передавальні функції кожної з ланок (рис. 2.8) математичної моделі системи гідротранспорту в цілому реалізуються як

$$\begin{aligned}
 P_1(s) &= B_{0,1}(s) \cdot B_1(s); \\
 P_2(s) &= B_{0,1}(s) \cdot B_1(s) \cdot B_{1,2}(s) \cdot B_2(s); \\
 P_3(s) &= B_{0,1}(s) \cdot B_1(s) \cdot B_{1,2}(s) \cdot B_2(s) \cdot B_{2,3}(s) \cdot B_3(s); \\
 P_4(s) &= B_{0,1}(s) \cdot B_1(s) \cdot B_{1,2}(s) \cdot B_2(s) \cdot B_{2,3}(s) \cdot B_3(s) \cdot B_{3,4}(s) \cdot B_4(s); \\
 P_5(s) &= B_{0,1}(s) \cdot B_1(s) \cdot B_{1,2}(s) \cdot B_2(s) \cdot B_{2,3}(s) \cdot B_3(s) \cdot B_{3,4}(s) \cdot B_4(s) \cdot B_{4,5}(s) \cdot B_5(s)
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

де P_i – передавальні функції кожного елементу електромеханічної системи до i -го елементу;

B_i – вхідні функції i -х елементів, розраховані за методикою [38].

Найчастіше математичну модель електромеханічної системи подають у вигляді системи диференціальних рівнянь, проте, операторна форма методу ланцюгових дробів дозволяє, пропустивши етапи формування і рішення системи рівнянь, використовуючи дані еквівалентної схеми, знайти вирази системних функцій [135].

Шламові насоси працюють як в статичному, так і в динамічному режимах, що обумовлено непостійним фракційним складом перекачуваної пульпи. Динамічна ідентифікація режиму роботи електродвигуна шламового насоса виробляється на основі представлення шламового насоса моделлю (2.4). Динамічною моделлю системи гідротранспортування вважається сукупність еквівалентних схем динамічних ланок цієї системи. Динамічна модель ВГТС еквівалентна моделі однорядної ланцюгової механічної системи, в якій вхідна функція цієї моделі визначається виразами (2.5–2.7)

$$B_5(s) = \frac{1}{H_5(s) + \frac{1}{E_{4,5}(s) + \frac{1}{H_4(s) + \frac{1}{E_{3,4}(s) + \frac{1}{H_3(s) + \frac{1}{E_{2,3}(s) + \frac{1}{H_2(s) + \frac{1}{E_{1,2}(s) + \frac{1}{H_1(s)}}}}}}}}}}}}; \quad (2.5)$$

$$B_{4,5}(s) = \frac{1}{E_{4,5}(s) + \frac{1}{H_4(s) + \frac{1}{E_{3,4}(s) + \frac{1}{H_3(s) + \frac{1}{E_{2,3}(s) + \frac{1}{H_2(s) + \frac{1}{E_{1,2}(s) + \frac{1}{H_1(s)}}}}}}}}, \quad (2.6)$$

де $B_5(s)$ – рівняння коливань останньої маси (роликів підшипників);

$B_{4,5}(s)$ – рівняння коливань пружного безінерційного з'єднання між роликами підшипника і валом ШН.

Аналогічно реалізується модель коливань для попередніх ланок ланцюга. Для першої ланки коливальної системи, вхідна функція виглядатиме

$$B_1(s) = \frac{1}{\frac{GD^2}{4g}s^2 + \frac{1}{\mathcal{G}\omega_0 T_\partial + \mathcal{G}\omega_0 s}}; \quad (2.7)$$

де GD^2 – маховий момент ротора;

g – прискорення сили тяжіння, м/с²;

ν – умовний коефіцієнт крутизни статистичної характеристики;

T_∂ – електромагнітна постійна часу;

ω_0 – кутова швидкість магнітного поля, рад/с.

При розрахунку математичної моделі, що враховує задані параметри, у результаті отримана нормована спектральна щільність моменту, що крутить, на валу електродвигуна ШН, яку наведено на рис. 2.9. Для наочності прийнято, що ексцентриситет валу, робочого колеса і роликів підшипника дорівнює $0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

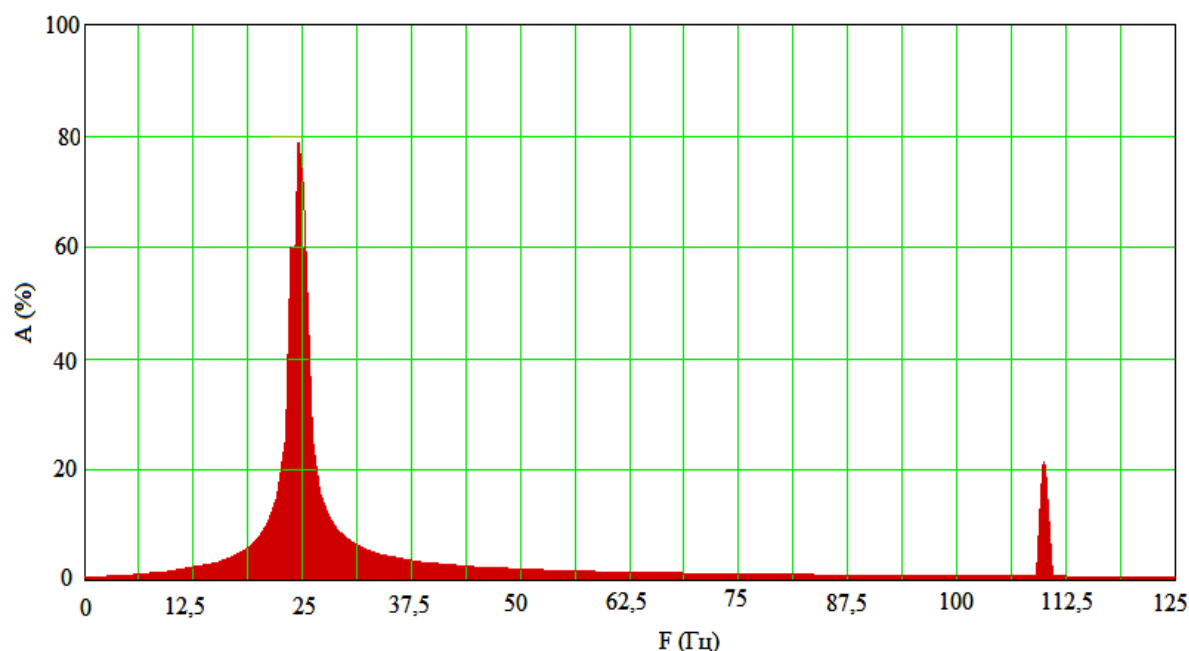


Рис. 2.9. Нормована спектральна щільність моменту, що крутить, на валу моделі шламового насоса

На рис. 2.9 можна виділити два піки: 25 Гц – частота обертання валу електродвигуна і основних деталей; 108 Гц – частота обертання роликів підшипників валу шламового насоса.

При зміні моделі, що імітує знос роликів підшипника (зменшення його діаметру на 2 %) результуючий графік коливань змінюється (рис. 2.10). Звідси видно, що частота обертання роликів підшипників валу шламового насоса збільшилася на 2,3 % до 110,5 Гц і з'явилася додаткова частота вібрації, рівна подвоєній частоті вібрації підшипників, рівна 221 Гц.

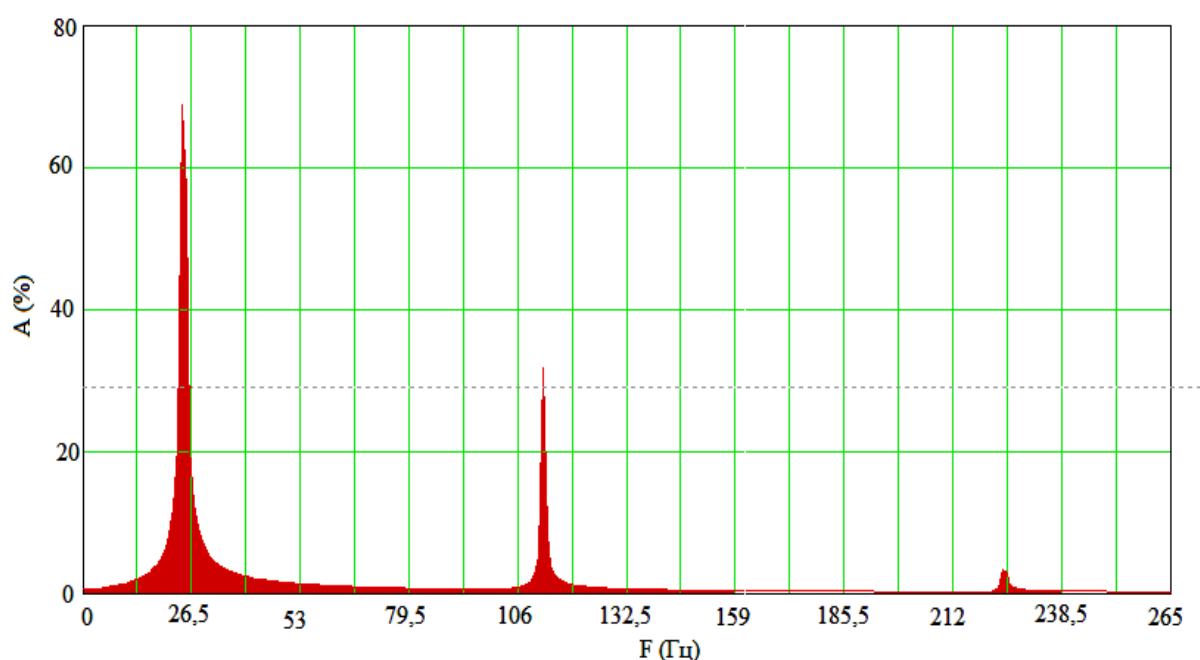


Рис. 2.10. Нормована спектральна щільність моменту, що крутить, на валу моделі шламового насоса з імітацією зносу підшипників

При введенні в цю ж модель даних, що імітують вигин валу (вал був представлений чотирма елементами, що мають різний ексцентриситет, введена ланка, що відповідає за тертя валу, що прогнувся) амплітудно-частотна характеристика вібраційної активності набула вигляду, що наведено на рис. 2.11, на якому помітне зменшення частоти обертання робочого колеса ШН і, власне, валу, та збільшення амплітуди їх коливань і невелике зменшення частоти обертання підшипників.

В результаті проведених експериментальних досліджень у відділенні флотації другої збагачувальної фабрики Полтавського ГЗКа, більшість з вищеписаних частот були експериментально підтверджені [134], що дає можливість говорити про відповідність розробленої математичної моделі реальним даним.

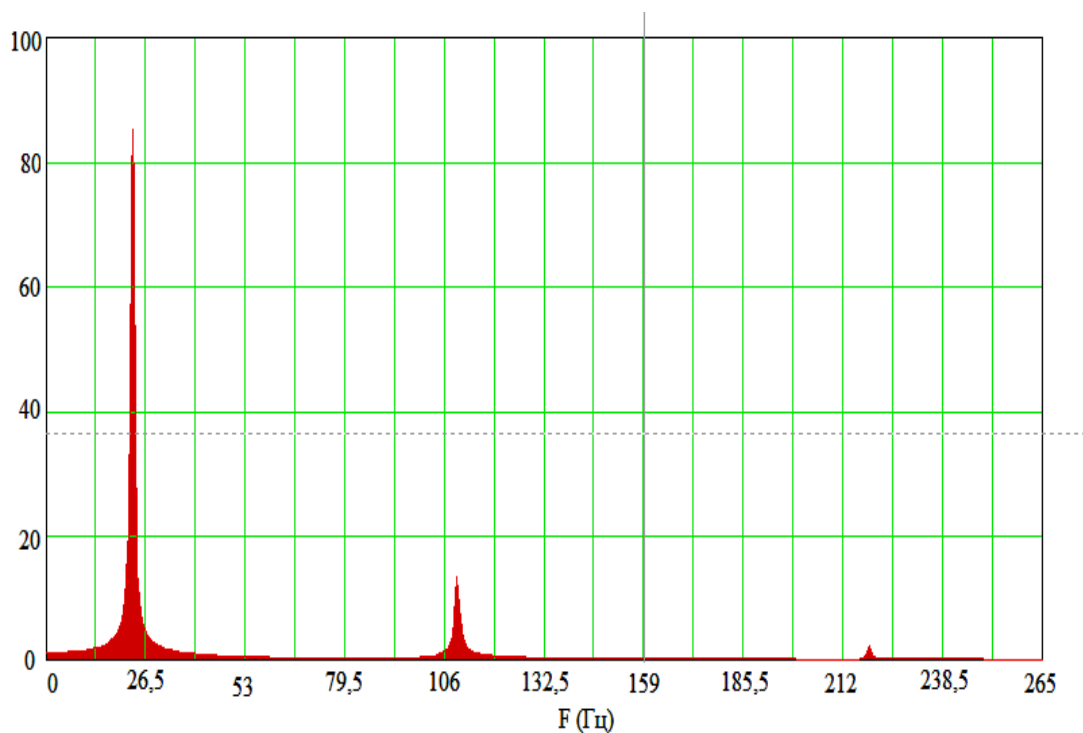


Рис. 2.11. Нормована спектральна щільність моменту, що крутить, на валу моделі шламового насоса з імітацією зносу підшипників і прогином валу шламового насоса

У результаті виконаних досліджень отримана математична модель шламового насоса 5-ГрК8, заснована на методі ланцюгових дробів, який дозволяє відобразити в операторній формі електромеханічну конструкцію шламового насоса, а також вносити до моделі зміни в процесі роботи шляхом зміни і перерахунку складових ланок рівняння, яка на відміну від раніше запропонованих моделей дозволяє отримати амплітудно-частотні характеристики моделі технологічних об'єктів у штатних і аварійних станах, які адекватні та імовірно достовірні знятим експериментальним даним.

Для аналізу стану ВГТС необхідно також визначити параметри, що можуть бути застосовані для цілей діагностики стану ВГТС та технологічного процесу гідротранспортування.

2.3. Діагностичні ознаки аварійних станів внутрішньофабричних гідротранспортних систем

Вибір методології діагностики гідротранспортних систем як об'єктів автоматизації обумовлений множиною умов. Основною з них є мета діагностування, що формується при визначенні періоду життєвого циклу, на якому знаходиться об'єкт, що діагностується.

У період планової експлуатації, в результаті поступового зносу елементів, що становлять систему гідротранспорту, в них відбуваються деградаційні зміни як структурних, так і функціональних параметрів, які у результаті і призводять до появи різних відмов.

Експлуатаційна діагностика систем гідротранспорту дозволяє заздалегідь, до настання передаварійного і аварійного стану системи, визначити вид виникаючого дефекту та об'єм ремонтних робіт для його ліквідації. При цьому в процес діагностування бажано включати оцінки передремонтного та післяремонтного технічних станів гідротранспортної системи.

Для контролю стану системи гідротранспорту доцільно відстежувати коливання, що виробляються системою. Як показано в роботах [131–134], такі коливання пропорційно впливають на споживану системою енергію, що дозволяє замінити процес вібродіагностики гідротранспортної системи на процес енергодіагностики. Ідентифікація таких коливань повинна вироблятися комплексно і не лише для окремих дискретних складових, але для усього спектру коливань в цілому, унаслідок багатозначності стохастичних зв'язків між технологічними параметрами.

Основною передумовою технології енергетичної діагностики електромеханічних агрегатів є положення про можливість розробки та

практичної реалізації методів виділення та оцінки інформативних параметрів технічного стану об'єкта, що діагностується, за характеристиками енергоспоживання цього об'єкта. Причиною вібрацій є збуджуючі сили, що виникають при роботі машин. Їх джерелами можуть бути як рухомі зворотно-поступальні рухи елементів, так і обертання неурівноважених мас, наприклад, роторів електричних машин, валів і підшипників, а також при обертанні будь-яких елементів механізму, в яких може з'явитися дисбаланс або із-за неточності виготовлення, зносу або із-за конструктивних особливостей машини. Частота вимушених коливань гідротранспортної системи визначається частотою збуджуючої сили. Якщо збуджуюча сила виникає із-за обертання неурівноваженої маси з кутовою швидкістю ω , то і частота вимушених коливань рівна ω , при цьому вібраційне зміщення агрегату змінюється за гармонійним законом $y = y_m \sin ft$, де y – зміщення агрегату, м; y_m – амплітуда зміщення, м; t – час, с; f – частота вимушених коливань, Гц. Фізичною основою методу енергодіагностики є закон збереження енергії. Проведене імітаційне моделювання без урахування нелінійних характеристик взаємодії показало 98,2 % кореляцію між результатами вібродіагностики і енергодіагностики, що дозволяє говорити про можливість застосування енергодіагностики, ґрунтуючись на раніше отриманих результатах досліджень в області вібродіагностики [131].

Найбільш ефективним контролем у період робочої експлуатації є безперервний контроль представницьких діагностичних параметрів оцінки технічного стану гідротранспортних систем для раннього виявлення дефектів, що зароджуються, виявлення причин і координат виникнення дефектів, оцінки тенденції зміни поточного технічного стану. Складна електромеханічна система, якою є ВГТС, складається з ряду конструктивних елементів, сполучених відповідно до певної заданої структури. Залежно від місця включення елемента його відмова може викликати або порушення працездатності окремого вузла або системи в цілому. При цьому реальна складність функціональних зв'язків між складовими елементами систем гідротранспорту та множина їх структурних параметрів дуже ускладнюють формалізацію опису руху усієї системи. Для

вирішення цього завдання аналізовану систему доцільно розділити на підсистеми, виконавши таким чином структурну декомпозицію.

Описані в першому розділі системи контролю гідротранспорту вимірюють такі параметри, як температура і щільність пульпи, її дисперсність, в'язкість, стисливість, критичну швидкість течії; силу струму і напруги в приводному електродвигуні шламового насоса, і характеризуються частотою обертання приводу, частотою обертання робочого колеса, об'ємно-масовими параметрами усіх елементів системи гідротранспортування, висоту підйому, тиском і висотою всмоктування. Для діагностування стану системи гідротранспорту пропонується використовувати як основне джерело інформації показники СМАП приводного електродвигуна шламового насоса, а як додаткові джерела – показники щільності пульпи, положення регулюючої заслінки, і технологічні вимоги режимів роботи суміжних з гідротранспортною системою виробничих циклів. Для достовірної оцінки даних роботи гідротранспортної системи необхідно мати інформацію про розмір і конфігурацію трубопроводу та конструкції шламового насоса [131, 134].

В результаті аналізу можливих несправностей і нештатних ситуацій на гідротранспорті, була сформована схема причинно-наслідкових зв'язків аварійних ситуацій, несправностей і їх ознак (рис. 2.12), в якій: 1 – ушкодження обмоток статора електродвигуна; 2 – вихід з ладу сполучної муфти; 3 – вигорання контактів магнітного контактора; 4 – розрив валу в поперечному напрямі; 5 – вихід з ладу підшипників; 6 – недостатній тиск; 7 – відключення і незапуск двигуна; 8 – підвищена вібрація усього агрегату; 9 – перегрівання підшипників; 10 – протікання в ущільненні; 11 – механічні ушкодження в насосі; 12 – невідповідність тиску розрахунковому значенню; 13 – невідповідність подачі розрахунковому значенню; 14 – повітряна подушка; 15 – неправильне обертання ротора; 16 – засмічення проточної частини насоса; 17 – зниження швидкості обертання двигуна; 18 – послаблення контактів електропід'єднування; 19 – робота в режимі кавітації; 20 – підвищені навантаження на підшипник; 21 – порушення центрування валів насоса і двигуна; 22 – неправильний проміжок між обоймою і кришкою підшипника; 23 – проблеми з мастилом; 24 – знос

вкладишів; 25 – попадання на підшипники пульпи; 26 – підсос повітря; 27 – недостатнє заповнення робочою рідиною; 28 – протікання ущільнення сальника; 29 – протікання ущільнення насоса; 30 – затвердіння набивання; 31 – мало набивання; 32 – не підігнаний сальник; 33 – перевищення висоти підйому; 34 – виткове замикання в двигуні; 35 – конструктивна вада при установці; 36 – неправильна кількість мастила підшипників; 37 – невірний вибір мастила; 38 – засмічення мастила; 39 – збільшення опору трубопроводу; 40 – засмічення трубопроводу; 41 – опущена заслінка; 42 – ушкодження трубопроводу; 43 – спрацьовування захисної автоматики; 44 – спрацьовування запобіжників; 45 – знос деталей проточної частини; 46 – прогин валу; 47 – механічне ушкодження робочого колеса; 48 – порушення балансування робочого колеса; 49 – недостатня жорсткість кріплення усього агрегату; 50 – неправильне розточування сполучних муфт; 51 – неміцний фундамент; 52 – напруга, що створюється неправильно підключеними трубами; 53 – зачіпання рухомих деталей об нерухомі

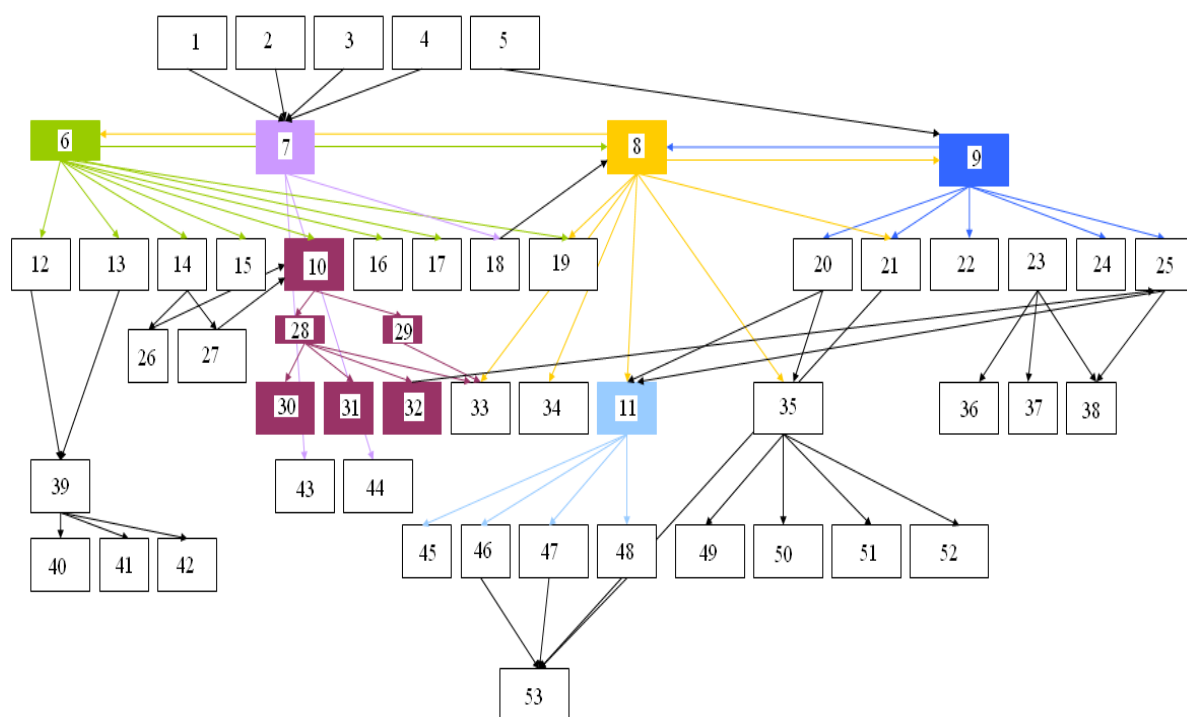


Рис. 2.12. Схема причинно-наслідкових зв'язків аварійних ситуацій, несправностей та їх ознак у системах гідротранспорту

На наведеній схемі класифікації причин відмов детально розглянута система взаємозв'язків несправностей гідротранспортної системи, тобто вірогідна послідовність аварійних ситуацій, які можуть виникнути при неспрацьовуванні захисної автоматики і невтручанні персоналу. Після подальшої обробки і декомпозиції схеми і зведеної таблиці несправностей (табл. 1.1), отримана таблиця, що містить список елементів, список несправностей для кожної з них, список ознак, супроводжуючих кожен несправність і методи діагностики і ремонту (див. дод. А). Також, за результатами аналізу табл. 1.1 сформовані схеми «Елемент-Відмова-Ознака» [136, 137] для кожного з вузлів. На рис. 2.13–2.17 наведено такі схеми для окремих елементів ВГТС, що дають можливість оцінити поточну ситуацію за сукупністю ознак. В цілому, розроблена система діагностичних ознак здатна не лише дати поточну оцінку ситуації, але і дати послідовний прогноз розвитку і переходів стану об'єкта.

2.4 Обґрунтування критеріїв ідентифікації стану системи гідротранспорту гірничо-збагачувального підприємства

Для аналізу спектральних характеристик споживаної миттєвої активної потужності приводного електродвигуна шламового насоса в роботах [125, 126] за такий критерій оцінки стану ВГТС береться максимальна подібність спектру, отриманого з двигуна шламового насоса, і спектру, що є еталонним для того або іншого режиму його роботи.

Для визначення максимальної подібності двох спектрів споживаної миттєвої активної потужності приводного електродвигуна шламового насоса як цільова функція використовується зважена евклідова відстань, в якій вагами є амплітуди спектру еталонної моделі (2.8)

$$P = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i \cdot (A_i - B_i)^2}, \quad (2.8)$$

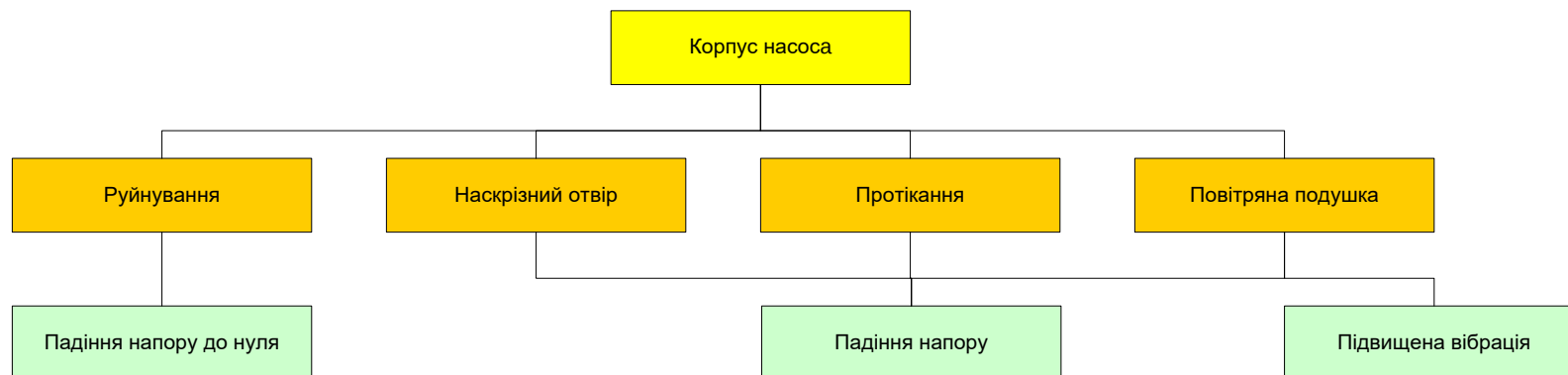


Рис. 2.13. Схема «Елемент-несправність/Відмова-ознака» для корпусу насоса

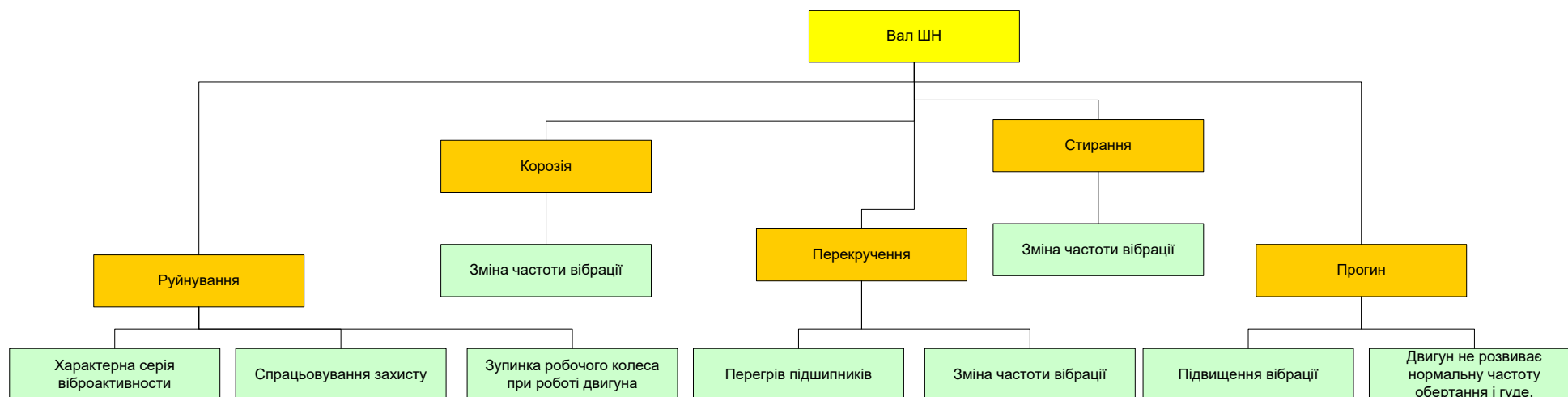


Рис. 2.14. Схема «Елемент-несправність/Відмова-ознака» для валу насоса

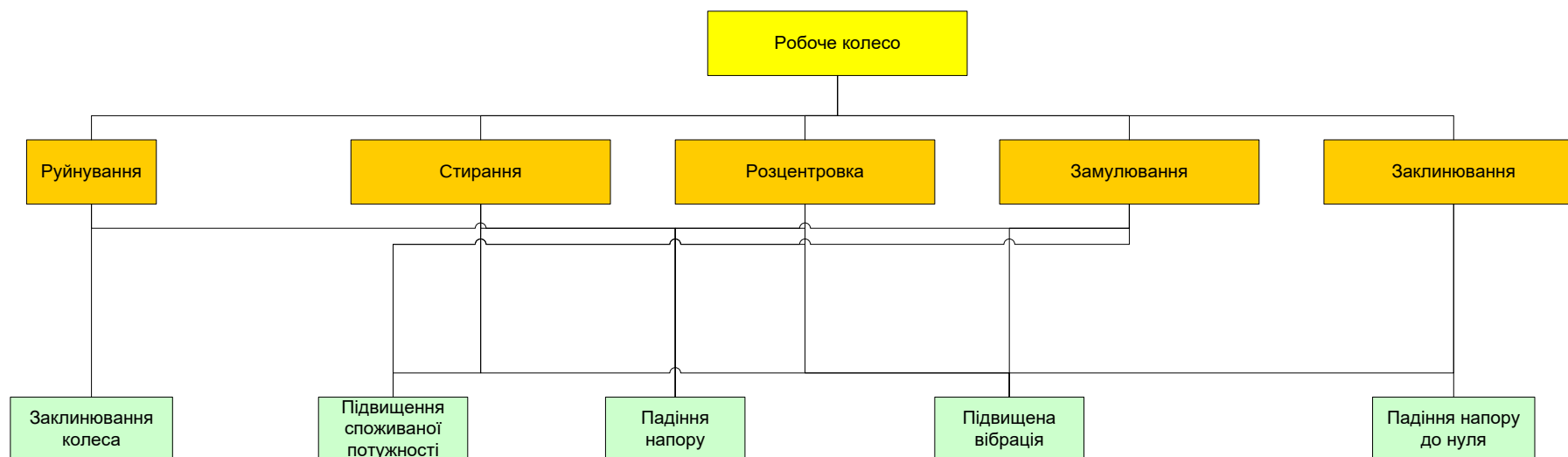


Рис. 2.15. Схема «Елемент-несправність/Відмова-ознака» для робочого колеса

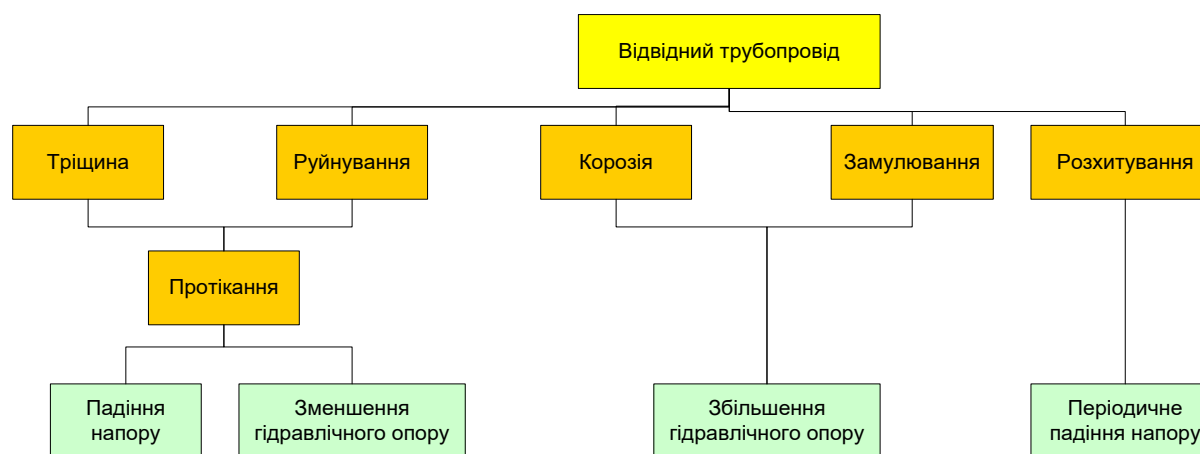


Рис. 2.16. Схема «Елемент-несправність/Відмова-ознака» для трубопроводу, що відводить рідину

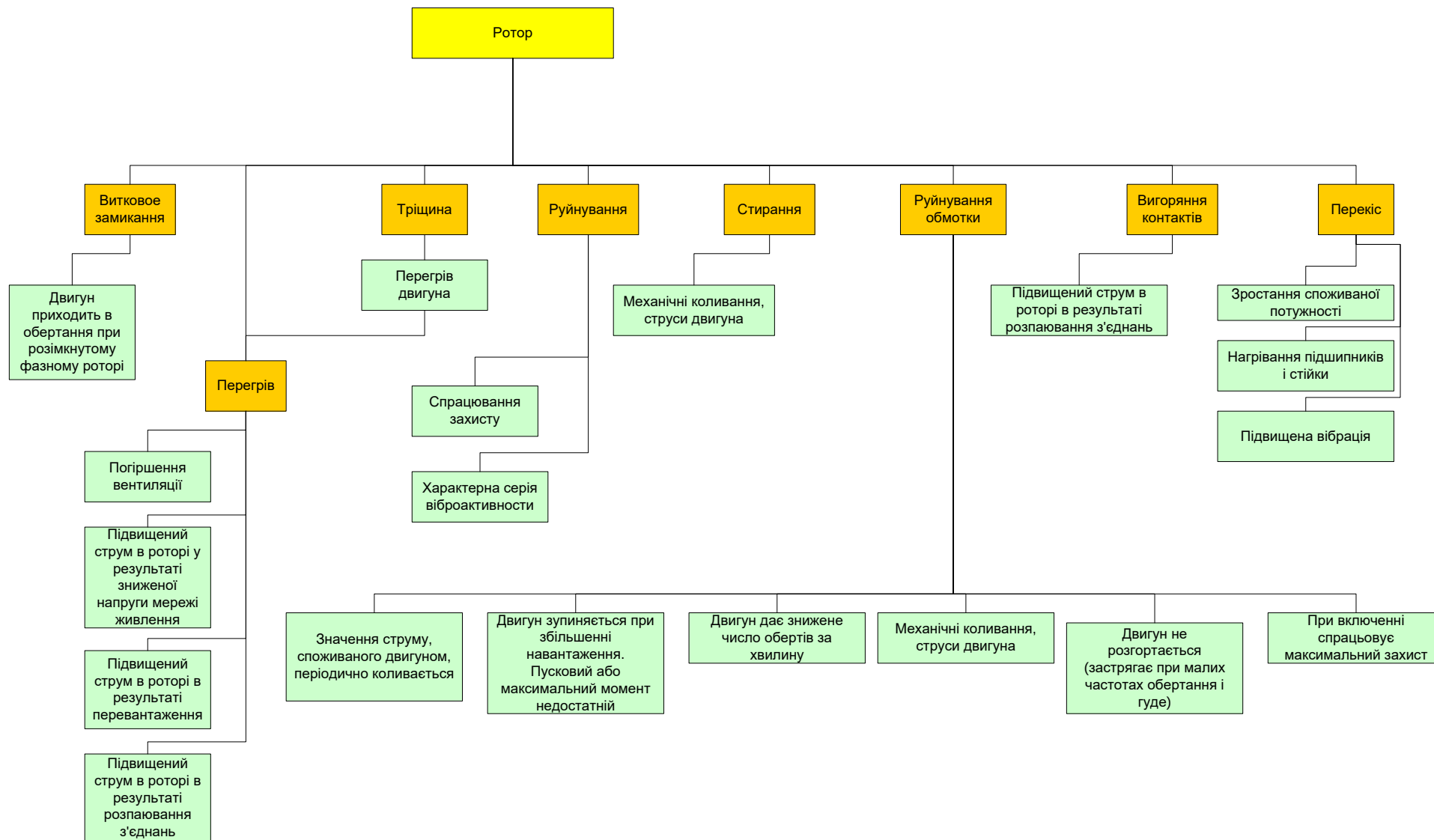


Рис. 2.17. Схема «Елемент-несправність/Відмова-ознака» для ротора приводного електродвигуна

де w_i – вага i -го елемента спектру;

A_i – значення амплітуди i -го елемента спектру еталонної моделі, %;

B_i – значення амплітуди i -го елемента спектру, отриманого від реального об'єкта, %.

Таким чином, критерій оцінки подібності спектрів можна записати як мінімум відмінності між спектрами, тобто

$$F : P_j \rightarrow \min . \quad (2.9)$$

Проведене моделювання в системі MATLAB подібності спектрів СМАП приводного електродвигуна з фільтрацією білих шумів і вібраційної активності ВГТС в цілому за критеріями (2.8) і (2.9) показало, що подібність між спектральним контролем СМАП і загальним станом агрегата складає від 96 до 98,5 %. Таким чином, можна зробити висновок, що діагностика розглянутих параметрів дозволить проводити своєчасний технологічно обґрунтований контроль стану гідротранспортної системи.

Розробка систем розпізнавання та попередження аварійних станів, що є автоматичними системами діагностування для систем гідротранспорту, обумовлює необхідність формування словників діагностичних ознак. При статистичній незалежності ознак x_j , де $j = 1..m$ вираз $\lim_{m \rightarrow \infty} \left\{ P\left(\sum_{i=1}^m x_i\right) \right\} = 1$, значить,

що при необмеженому збільшенні отримуваної інформації, в цілому, досягається достовірне розпізнавання. Звідси ж видно, що при фіксованому розмірі словника ознак вірогідність розпізнавання збільшується при зменшенні алфавіту класів. Тому при синтезі системи діагностування гідротранспорту необхідно раціонально оцінювати, які класи технічних станів гідротранспортної системи доцільно включати в алфавіт станів, що діагностуються. Виділення якісних діагностичних ознак з характеристик комплексних коливальних процесів найбільш чутливих до зміни технічного стану системи гідротранспорту якнайповніше забезпечить раннє розпізнавання передаварійних станів. Вибір діагностичних ознак вимагає

однозначності їх зв'язку із станом гідротранспортної системи, і високій чутливості, що забезпечує більш раннє розпізнавання появи дефектів, із забезпеченням достатньої глибини діагнозу при допустимих параметрах.

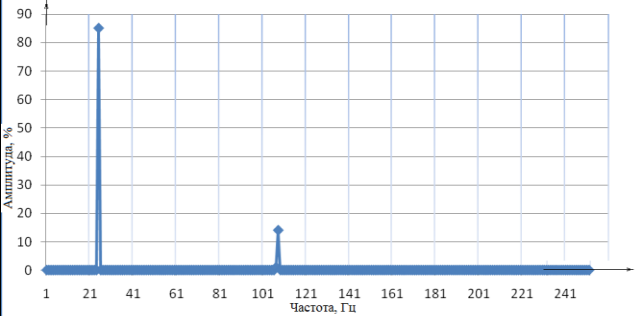
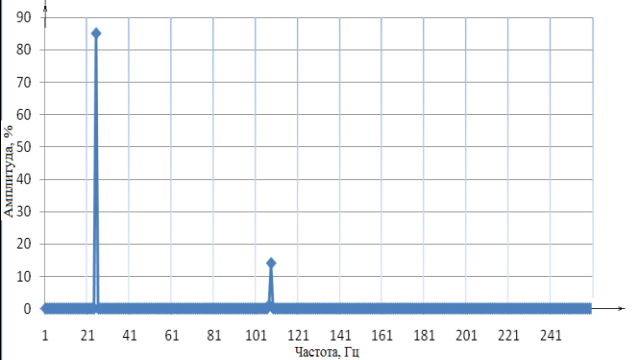
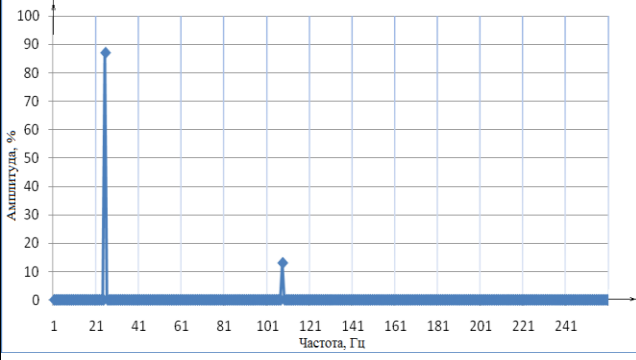
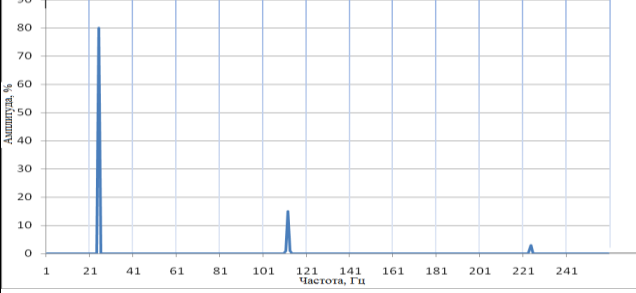
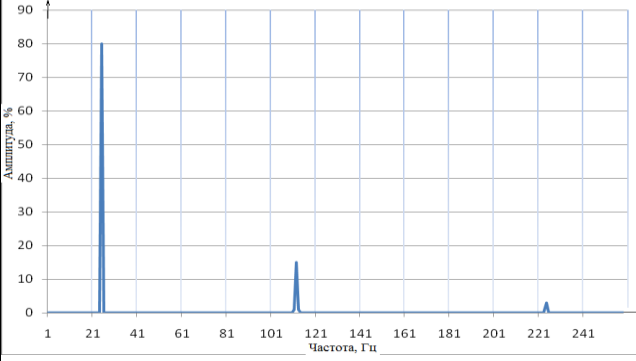
З розділу 2.3 виходить, що параметром внутрішньофабричної системи гідротранспорту, що якнайповніше відображує стан усієї системи, є частотний спектр показників СМАП електродвигуна ІН. Оскільки аналізом [131] показано, що існує пряма залежність між вібраційною активністю механізму і СМАП, то для контролю стану системи гідротранспорту як діагностичні інформаційні показники можливо використовувати аналогічні критерії, стосовно спектрів СМАП. Прийнявши за основу табл. 1.1 і 1.2, а також ґрунтуючись на розділах 2.1 і 2.2, сформована еталонна таблиця «Режим роботи – Спектр СМАП» (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

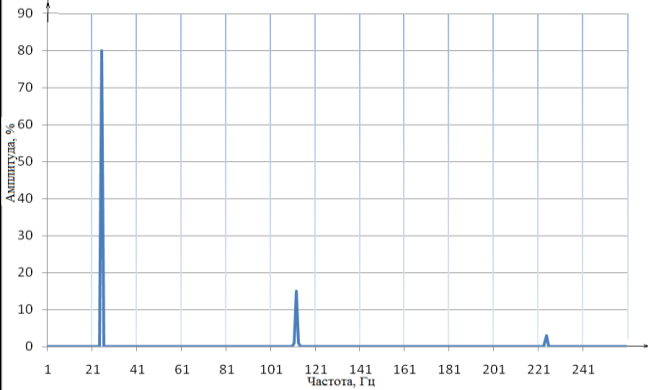
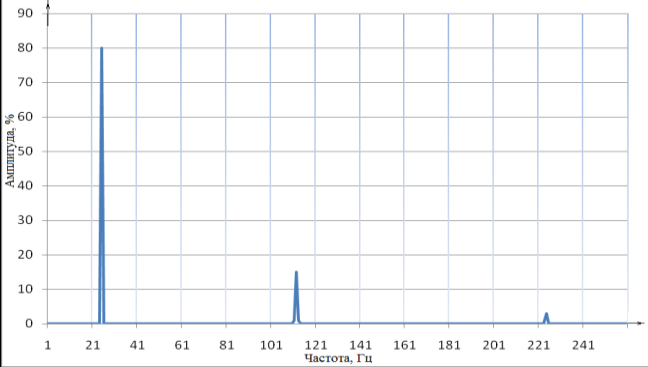
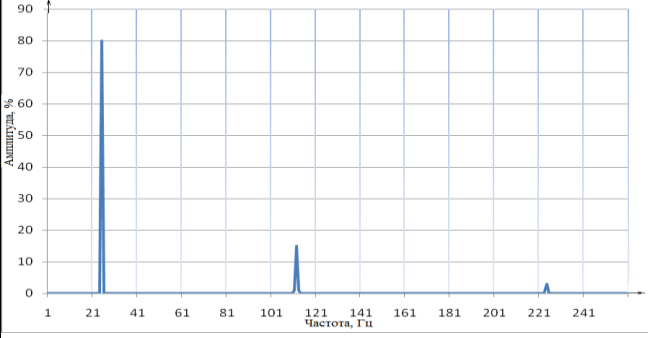
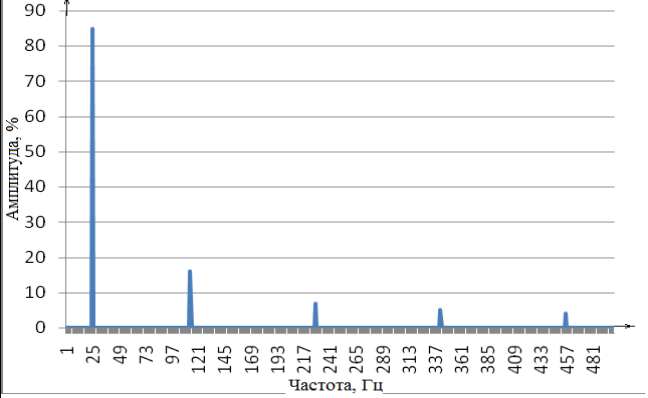
Режим роботи – спектр СМАП

№	Режим роботи	Еталонний спектр	Примітки
1	Нормальний		Частоти відповідають частотам відрегульованого агрегату
2	Нормальний		Частоти відповідають частотам відрегульованого агрегату та підвищення амплітуди робочої частоти

Продовження табл. 2.2

3	Нормальний		Частоти відповідають частотам відрегульованого агрегату та 1 % підвищення частоти підшипників
4	Нормальний		Частоти відповідають частотам відрегульованого агрегату
5	Нормальний		Частоти відповідають частотам відрегульованого агрегата – 1 % амплітуди підшипників
6	Знос підшипників		Збільшення частоти підшипників більш ніж на 2 % та прояв додаткових спектральних складових на двократній частоті
7	Знос підшипників		Збільшення частоти підшипників на 2 % та підвищення амплітуди на 2,5 % і прояв додаткових спектральних складових на двократній частоті

Продовження табл. 2.2

8	Знос підшипників		Збільшення частоти підшипників на 2,3 % та підвищення амплітуди на 3 % і прояв додаткових спектральних складових на двократній частоті
9	Знос підшипників		Збільшення частоти підшипників на 2,1 % та підвищення амплітуди на 2,6 % і прояв додаткових спектральних складових на двократній частоті
10	Знос підшипників		Збільшення частоти підшипників на 2,8 % та підвищення амплітуди на 3,6 % і прояв додаткових спектральних складових на двократній частоті
11	Сильний знос підшипників		Зрушення частоти підшипників на 5 % та множинний прояв додаткових спектральних складових на частотах, кратних основній для підшипників

Продовження табл. 2.2

12	Сильний знос підшипників		Зрушення частоти підшипників більш ніж на 5,5 % та множинний прояв додаткових спектральних складових на частотах, кратних основній для підшипників
13	Сильний знос підшипників		Зрушення частоти підшипників більш ніж на 5,8 % та множинний прояв додаткових спектральних складових на частотах, кратних основною для підшипників
14	Сильний знос підшипників		Зрушення частоти підшипників більш ніж на 6 % та множинний прояв додаткових спектральних складових на частотах, кратних основною для підшипників
15	Послаблення кріплення		Поява спектральних складових на частотах, рівних 0,5; 1,5; 2; 2,5 від основної

Продовження табл. 2.2

16	Послаблення кріплення		Поява спектральних складових на частотах, рівних 0,5; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5 від основної
17	Послаблення кріплення		Поява спектральних складових на частотах, рівних 0,5; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5 від основної
18	Кавітація		З'явилися високочастотні складові в спектрі

У результаті проведених досліджень запропоновані діагностичні ознаки станів ВГТС, засновані на методиці контролю показників СМАП приводного двигуна шламового насоса, які, на відміну від раніше запропонованих методів вібраційної діагностики стану ВГТС, дозволяють проводити ідентифікацію та контроль параметрів об'єкта без застосування додаткового вібраційного устаткування, обходячись стандартними засобами контролю.

Для підтвердження правомірності застосування цих методів і моделей на меті дослідницьких та прикладних завдань проведено ряд експериментальних досліджень, розглянутих у наступних розділах.

Висновки до розділу 2

На підставі розглянутого матеріалу з управління системою гідротранспортування на збагачувальній фабриці отримані наступні результати:

1. Сформована модель гідротранспортної системи, заснована на багатомасовій системі роторів Джеффкотта-Лавалю, придатна для внутрішньофабричних гідротранспортних систем з підстроюванням параметрів, що враховують знос устаткування, що на відміну від існуючих моделей, враховує багатомасові коливання роторних елементів.

2. Сформована модель гідротранспортної системи, заснована на методі операторної форми ланцюгових дробів, що придатна для аналізу станів гідротранспортних мереж з насосним устаткуванням типу 5-ГРк8 на основі контролю спектральних характеристик. Подібна модель, на відміну від подібних, вперше пристосована для контролю саме гідротранспортних мереж.

3. Встановлений перелік основних несправностей гідротранспортних систем, перетворений в схему причинно-наслідкових зв'язків ознак і станів гідротранспортних систем, що включають більше 50 чинників, оперативний облік і контроль яких підвищить загальну надійність роботи гідротранспорту та його енергоефективність.

4. Встановлено, що є пряма залежність між такими властивостями елементів системи гідротранспорту як маса, конструктивні параметри, технологічні параметри і частотами спектру СМАП приводного електродвигуна ШН. Показано, що нормальна робота цієї системи можлива тільки в певних межах коливання частот; під час переходу через ці межі нормальна робота системи гідротранспорту є не можливою, що дає змогу більш точного регулювання та контролю гідротранспортних мереж.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ТА КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ВНУТРІШНЬОФАБРИЧНОГО ГІДРОТРАНСПОРТУВАННЯ

3.1. Розробка методики експериментальних досліджень процесу внутрішньофабричного гідротранспортування шламів

Метою промислових експериментальних досліджень є визначення основних діагностичних параметрів систем гідротранспорту, які базуються на методі діагностики сигналів потужності, для розробки нових методів і систем керування виробничим гідротранспортом шламів. Для досягнення поставленої мети необхідно:

а) досліджувати ефективність роботи діючих систем автоматизації гідротранспорту залежно від таких параметрів, як щільність шламу, що поступає, витрати руди і води, СМАП приводного електродвигуна шламового насоса, частоти обертання електродвигуна, дій оператора насосної станції;

б) класифікувати можливі режими роботи гідротранспортної системи;

в) визначити залежності спектрів енергоінформаційних сигналів від щільності шламу, що поступає, частоти обертання електродвигуна, витрати руди і води, іншого роду несправностей в системі гідротранспортування, описаних в розділах 1.2 і 2.3;

г) побудувати теоретичну модель на основі даних, отриманих з технічної документації, та встановити кореляційні залежності між теоретичною моделлю, що ідеалізується, і даними, отриманими від гідротранспортної системи;

д) внесення уточнюючих коефіцієнтів до моделі для повнішої відповідності моделі реальній системі, що ідеалізується, і побудови на основі вдосконаленої моделі системи підтримки ухвалення керуючих рішень.

Відповідно до вище викладеного, методика проведення експериментальних досліджень має такий вигляд:

- розташувати та підключити датчики за приведеною схемою (рис. 3.1) згідно з вимогами виробничої техніки безпеки;
- включити дослідницьку станцію та запустити завдання стеження і запису датчиків.

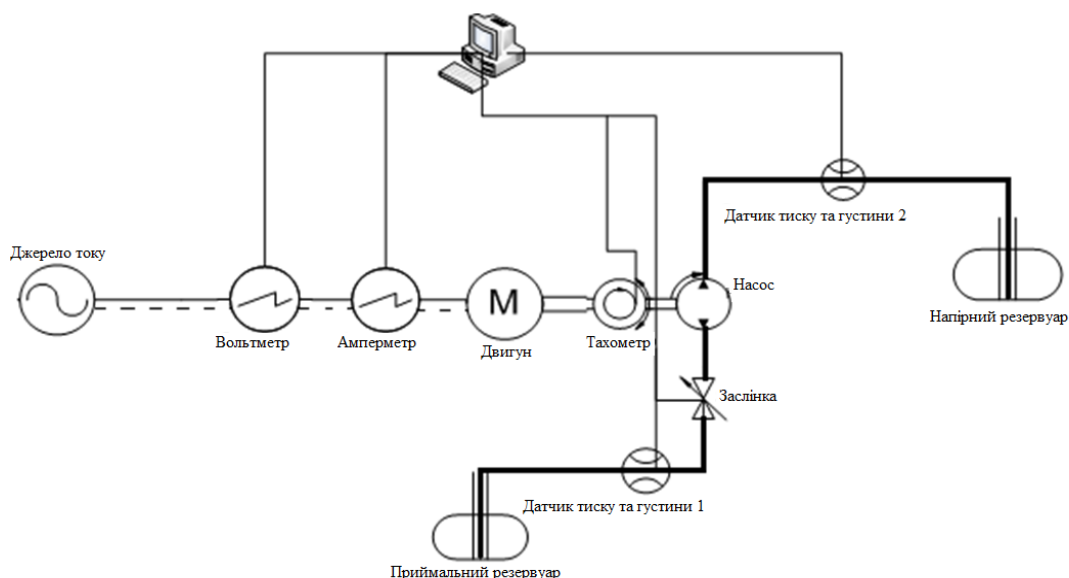


Рис. 3.1. Схема розташування датчиків в експериментальних умовах

У ході експериментальних досліджень необхідно вивчити: нормальний режим роботи; режим роботи з підвищеною щільністю пульпи; режим роботи зі зниженою щільністю пульпи; вище описані режими із заслінкою насоса в різних положеннях; за наявності технологічної можливості – аварійні та передаварійні режими.

Для вище описаних цілей експериментальних досліджень у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» (Національний гірничий університет) був створений програмно-апаратний комплекс NGU-Hydra (NGUHYDRA 1.0, додаток І), що дозволяє проводити як експериментальні дослідження, так і працювати в режимі поради оператора (додаток І).

Послідовність натурних експериментальних досліджень:

- включити систему гідротранспортування в першому з дослідницьких режимів (нормальний режим роботи);
- зробити позначку в програмі про вибраний режим роботи устаткування;

- дати системі необхідний час (від 5 до 60 хвилин – залежно від швидкості проходження пульпи в усій системі гідротранспорту) для збору необхідної інформації;
- в процесі збору інформації проводити повне протоколювання процесу і отримуваних даних;
- в процесі функціонування системи отримувати спектр частот коливання гідротранспортної системи за допомогою перетворень Фур'є, які також протоколювати;
- перемкнути систему гідротранспортування в наступний дослідницький режим роботи.

Для перевірки роботи програмного комплексу NGU-Hydra в режимі «Порадник оператора» у присутності висококваліфікованого персоналу провести тестування NGU-Hydra 1.0 (додаток И) і налаштувати цю систему за наступним алгоритмом:

- запустити NGU-Hydra на дослідницькій станції в режимі «Рада щохвилини» + «Рада в екстреному випадку»;
- запустити систему гідротранспорту;
- дати NGU-Hydra час на підлаштування від моделі незношеної ВГТС до параметрів реального агрегата (30 хв.);
- перевести систему гідротранспорту в передаварійні режими: кавітація, зниження швидкості до критичної, закрита на 90 і більше відсотків заслінки (а).

При виконанні умови правильних порад системи в усіх випадках, запустити систему підтримки ухвалення керуючих рішень, NGU-Hydra 1.0 у виробничий цикл (додатки В, Г, Е, Ж, И).

За запропонованою методикою на Полтавському ГЗКу було проведено дві серії експериментальних досліджень, покликаних підтвердити та уточнити математичні моделі, розроблені в другому розділі. Результати експериментальних досліджень приведені в додатках В і Г. Для підтвердження розроблених математичних моделей проведено статистичний аналіз даних, результати якого наведено в наступних підрозділах глави 3.

3.2. Кореляційно-спектральний аналіз результатів досліджень процесу внутрішньофабричного гідротранспортування шламів

Процеси, що відбуваються в електромеханічній системі ВГТС, як показано вище, відповідають моделям, описаним в розділах 2.1 і 2.2. Проте в цих розрахункових моделях неможливо врахувати безліч побічних випадкових чинників: як-то утворення бульбашки кавітації у визначеному місці робочого колеса шламового насоса, або силу удару частки переміщуваної потоком породи об лопать робочого колеса. Такі процеси є стохастичними, що можуть бути описані окремими статистичними залежностями.

Потужність, споживана шламовим насосом, не повністю реалізується на корисну роботу, і частина її втрачається на подолання гідравлічних опорів, протікання через ущільнення, механічні втрати. У порівнянні із звичайними насосами в шламових виникають додаткові опори внаслідок взаємодії твердих часток з потоком, деградації часток та інших явищ. Наявність додаткових втрат в насосах для гідросумішей зменшує їх ККД на 10–20 % в порівнянні з насосами для води; ККД зменшується із мірою зносу елементів машин. Повне уявлення про експлуатаційні властивості шламових насосів для гідросуміші дає їх робоча характеристика. Її визначають за результатами випробувань шламового насоса при прокачуванні води та гідросуміші.

Звідси витікає, що для діагностики стану системи гідротранспорту досить контролю таких параметрів, як показників споживаної насосом СМАП, показників датчика щільності пульпи та стану заслінки насоса. Крім того, необхідно знати механічні параметри насоса в ідеальному стані. Для виміру подібних показників і призначена система збору і обробки діагностичних даних ВГТС [138, 139]. Для уточненої побудови математичної моделі технологічного процесу потрібне проведення експерименту, здатного підтвердити теоретичні передумови та відсікти малозначимі параметри, якими надалі можна буде нехтувати. Основна мета дослідження такого роду полягає в тому, щоб виявити ефект дії певного чинника на залежну змінну, що вивчається. При проведенні

кореляційно-спектрального аналізу результатів досліджень процесу внутрішньофабричного гідротранспортування шламів досліджена залежність амплітудно-частотних характеристик (АЧХ), частот спектру СМАП від незалежних параметрів, таких як щільність пульпи, положення заслінки і зношеність механізмів і систем гідротранспорту. При проведенні промислового експерименту на Полтавському ГЗКу (додатки Б, В) основна мета полягала у відборі об'єктивної інформації про вплив чинників, що вивчалися, на виробничий процес за допомогою найменшого числа дорогих спостережень.

Таблиця початкових даних нормального стану роботи ВГТС була складена з випадково вибраних із загального масиву 120 спостережень і 250 змінних: 248 – залежних безперервних змінних (показники спектра Фур'є сигналу СМАП приводного електродвигуна 5AM315 S4), і 2 – незалежних безперервних змінних (щільність пульпи і рівень повороту заслінки ШН).

Розвідувальний аналіз застосовується для знаходження систематичних зв'язків між змінними в ситуаціях, коли відсутні (чи є недостатні) апріорні уявлення про природу цих зв'язків, і полягає, в основному, із стандартних методів аналізу та візуалізації. У цій частині дослідження розглянуті розподіли змінних для проведення точнішого аналізу надалі.

Аналіз розподілу потужності частот, що становлять спектр СМАП електродвигуна шламового насоса (рис. 3.2–3.4).

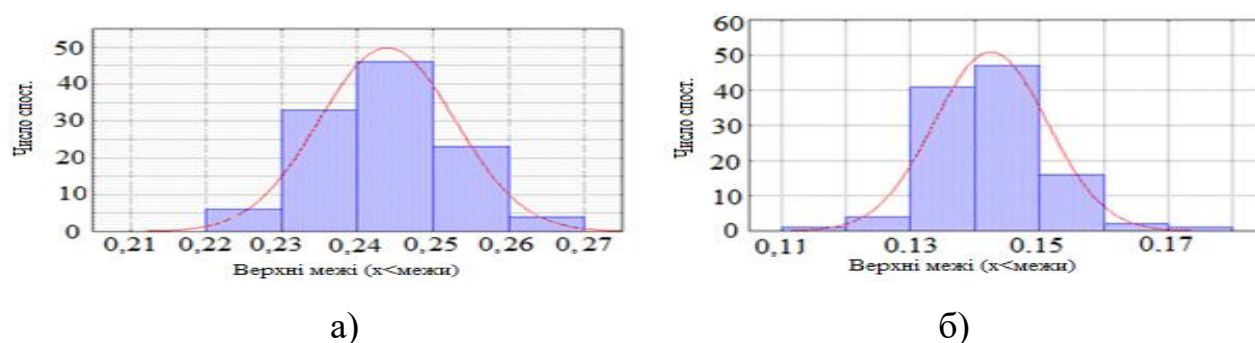


Рис. 3.2. Гістограми розподілу амплітуди нормованих спектрів СМАП для частоти 9 (а) і 12 (б) Гц

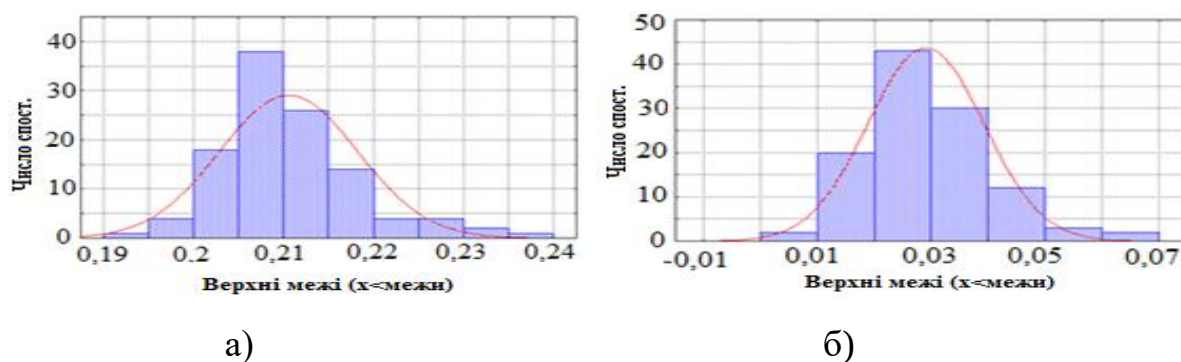


Рис. 3.3. Гістограми розподілу амплітуди нормованих спектрів СМАП для частоти 13 (а) і 18 (б) Гц

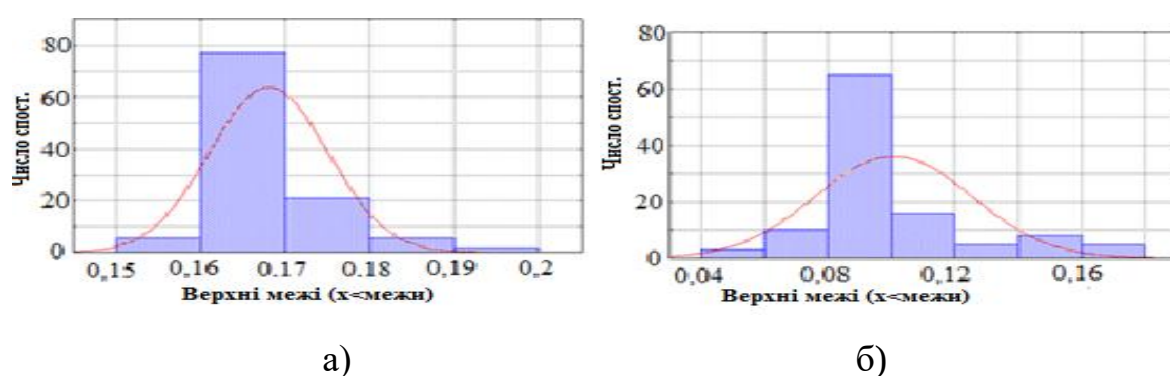


Рис. 3.4. Гістограми розподілу амплітуди нормованих спектрів СМАП для частоти 20 (а) і 34 (б) Гц

Наступним етапом аналізу є аналіз лінійних взаємозв'язків незалежних та і залежних змінних, кореляційний аналіз. За підсумками цього етапу вимагається отримати міри залежності змінних один від одного, що особливо важливо для доказу залежностей частот, що становлять спектр СМАП від незалежних змінних. Досліджені приватні коефіцієнти кореляції (табл. 3.1), що описують лінійний взаємозв'язок між двома частотами спектру, без урахування впливу інших змінних. З аналізу кореляційної матриці, а також графіків взаємно кореляційних залежностей (рис. 3.5–3.10) можна зробити висновок, що положення заслінки обернено пропорційно впливає на такі частоти в спектрі як 125, 44, 38 і 32 Гц. Окрім цього, можна помітити взаємозалежності між частотами самого спектра, що може бути обумовлено як характерними особливостями процесу, так і, що особливо важливе для експерименту, залежністю спектральних характеристик від параметрів механізму.

Таблиця 3.1

Взаємні кореляційні залежності між частотами спектра

	Var11	Var12	Var13	Var14	Var15	Var16	Var17	Var18
Var31	0,61	0,61	-0,21	-0,21	-0,21	0,66	0,66	0,66
Var32	0,61	0,61	-0,21	-0,21	-0,21	0,66	0,66	0,66
Var33	0,61	0,61	-0,21	-0,21	-0,21	0,66	0,66	0,66
Var34	-0,46	-0,46	0,43	0,43	0,43	-0,45	-0,45	-0,45
Var35	-0,46	-0,46	0,43	0,43	0,43	-0,45	-0,45	-0,45
Var36	-0,46	-0,46	0,43	0,43	0,43	-0,45	-0,45	-0,45
Var37	0,28	0,28	-0,38	-0,38	-0,38	0,34	0,34	0,34
Var38	0,28	0,28	-0,38	-0,38	-0,38	0,34	0,34	0,34
Var39	0,28	0,28	-0,38	-0,38	-0,38	0,34	0,34	0,34
Var40	-0,70	-0,70	0,25	0,25	0,25	-0,80	-0,80	-0,80
Var41	-0,70	-0,70	0,25	0,25	0,25	-0,80	-0,80	-0,80
Var42	-0,70	-0,70	0,25	0,25	0,25	-0,80	-0,80	-0,80
Var43	-0,01	-0,01	0,26	0,26	0,26	0,00	0,00	0,00
Var44	-0,01	-0,01	0,26	0,26	0,26	0,00	0,00	0,00
Var45	-0,01	-0,01	0,26	0,26	0,26	0,00	0,00	0,00
Var46	-0,28	-0,28	0,05	0,05	0,05	-0,36	-0,36	-0,36
Var47	-0,28	-0,28	0,05	0,05	0,05	-0,36	-0,36	-0,36
Var48	-0,28	-0,28	0,05	0,05	0,05	-0,36	-0,36	-0,36
Var49	0,60	0,60	-0,15	-0,15	-0,15	0,58	0,58	0,58
Var50	0,60	0,60	-0,15	-0,15	-0,15	0,58	0,58	0,58
Var51	0,60	0,60	-0,15	-0,15	-0,15	0,58	0,58	0,58
Var52	-0,36	-0,36	0,20	0,20	0,20	-0,47	-0,47	-0,47
Var53	-0,36	-0,36	0,20	0,20	0,20	-0,47	-0,47	-0,47
Var54	-0,36	-0,36	0,20	0,20	0,20	-0,47	-0,47	-0,47
Var55	0,28	0,28	0,14	0,14	0,14	0,30	0,30	0,30
Var56	0,28	0,28	0,14	0,14	0,14	0,30	0,30	0,30
Var57	0,28	0,28	0,14	0,14	0,14	0,30	0,30	0,30
Var58	-0,61	-0,61	0,50	0,50	0,50	-0,60	-0,60	-0,60
Var59	-0,61	-0,61	0,50	0,50	0,50	-0,60	-0,60	-0,60
Var60	-0,61	-0,61	0,50	0,50	0,50	-0,60	-0,60	-0,60
Var61	0,17	0,17	-0,26	-0,26	-0,26	0,04	0,04	0,04
Var62	0,17	0,17	-0,26	-0,26	-0,26	0,04	0,04	0,04
Var63	0,17	0,17	-0,26	-0,26	-0,26	0,04	0,04	0,04
Var64	-0,33	-0,33	0,45	0,45	0,45	-0,26	-0,26	-0,26
Var65	-0,33	-0,33	0,45	0,45	0,45	-0,26	-0,26	-0,26
Var66	-0,33	-0,33	0,45	0,45	0,45	-0,26	-0,26	-0,26
Var67	-0,08	-0,08	-0,07	-0,07	-0,07	-0,31	-0,31	-0,31
Var68	-0,08	-0,08	-0,07	-0,07	-0,07	-0,31	-0,31	-0,31
Var69	-0,08	-0,08	-0,07	-0,07	-0,07	-0,31	-0,31	-0,31

Продовження табл. 3.1

Var70	0,69	0,69	-0,21	-0,21	-0,21	0,70	0,70	0,70
Var71	0,69	0,69	-0,21	-0,21	-0,21	0,70	0,70	0,70
Var72	0,69	0,69	-0,21	-0,21	-0,21	0,70	0,70	0,70
Var73	-0,28	-0,28	-0,02	-0,02	-0,02	-0,29	-0,29	-0,29
Var74	-0,28	-0,28	-0,02	-0,02	-0,02	-0,29	-0,29	-0,29
Var75	-0,28	-0,28	-0,02	-0,02	-0,02	-0,29	-0,29	-0,29
Var76	0,52	0,52	-0,34	-0,34	-0,34	0,54	0,54	0,54

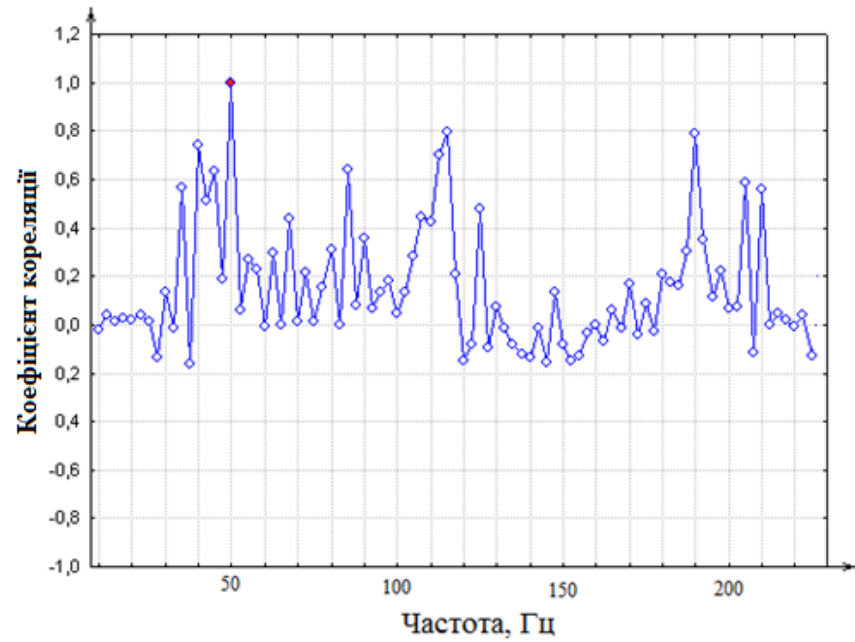


Рис. 3.5. Коефіцієнти кореляції частоти 50 Гц з іншими частотами спектра

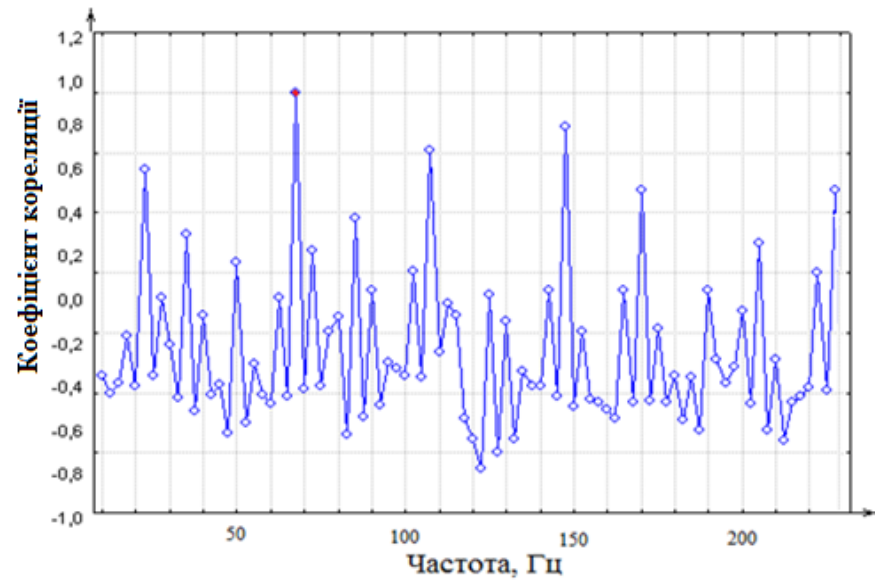


Рис. 3.6. Коефіцієнти кореляції частоти 75 Гц з іншими частотами спектра

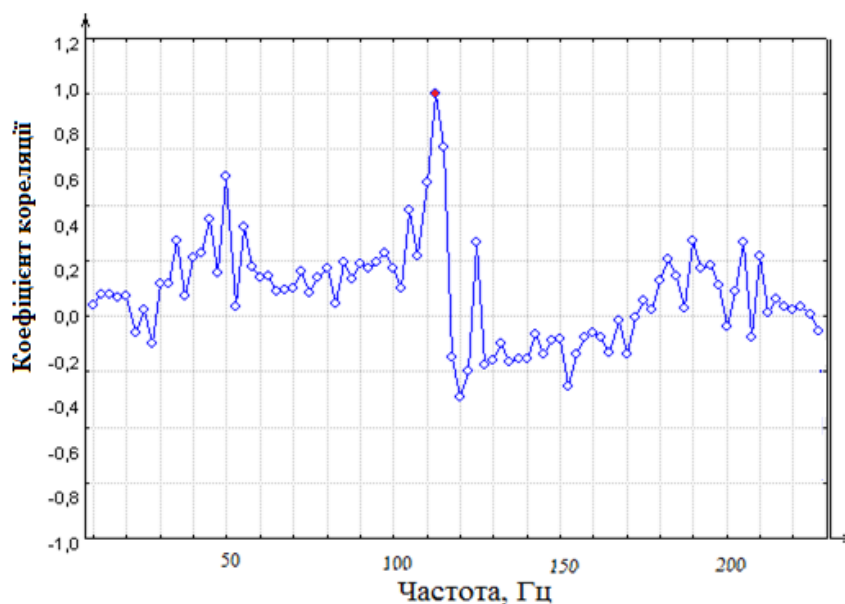


Рис. 3.7. Коефіцієнти кореляції частоти 110 Гц з іншими частотами спектра

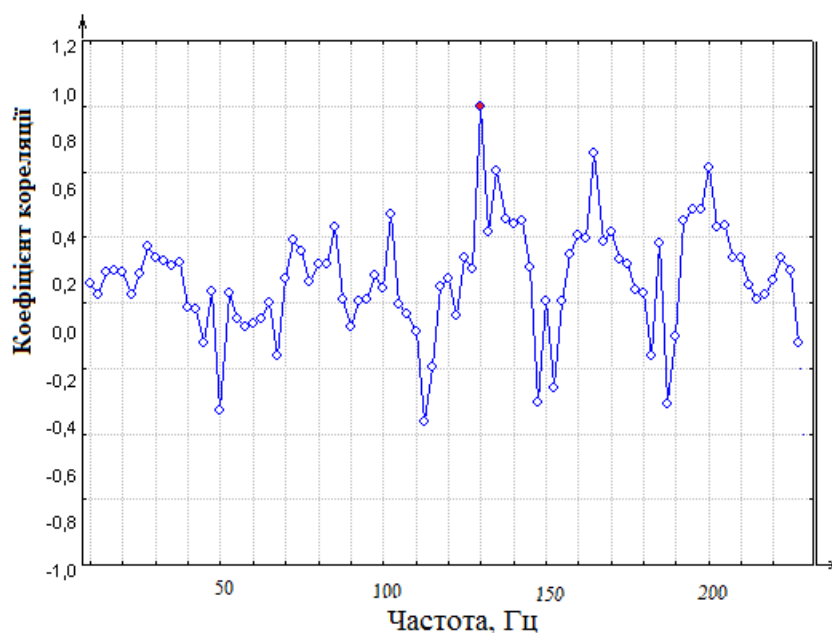


Рис. 3.8. Коефіцієнти кореляції частоти 130 Гц з іншими частотами спектра

Механічні коливання електродвигуна відображуються в його спектрі СМАП [131]. Відповідно, одним з пріоритетів дослідження є виявлення кореляційної залежності між спектром СМАП електродвигуна шламового насоса і механічними коливаннями системи гідротранспорту. У досліджуваному насосі 5-ГРк8 є такі рухомі елементи, як робоче колесо насоса, сполучний вал, ротор електродвигуна та підшипники. Частота обертання ротора, сполучного валу і робочого колеса співпадає та складає 25 Гц. У підшипниках стандарту 3536 знаходяться ролики

діаметром 35 мм, що складає 14/60 від діаметру валу, з яким підшипник безпосередньо контактує. Звідси витікає, що кінематична частота обертання роликів цих підшипників складає 103 Гц. При цьому необхідно враховувати той факт, що усі рухомі елементи приводу гідротранспортної системи можуть створити коливання не основної частоти, що може бути як наслідком неточної установки, так і наслідком зносу цієї деталі.

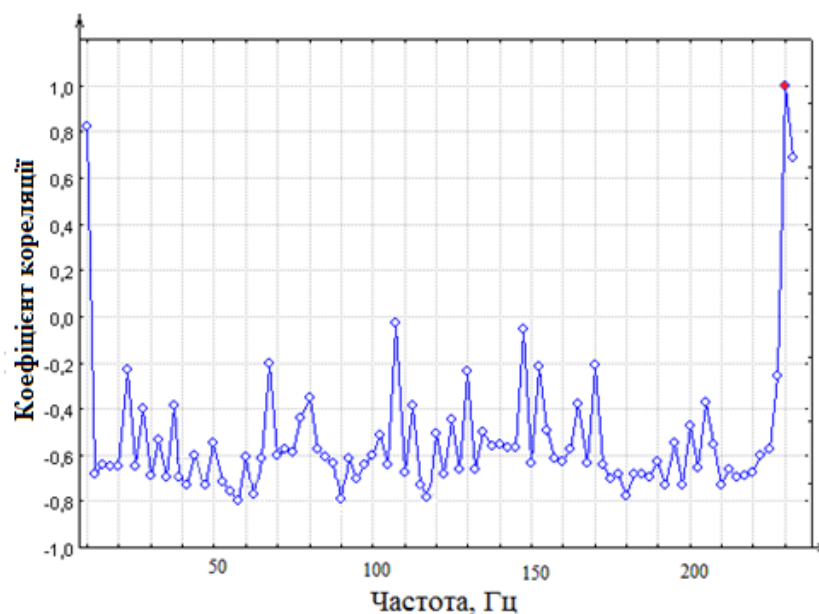


Рис. 3.9. Коефіцієнти кореляції густини пульпи з частотами спектра і положенням заслінки

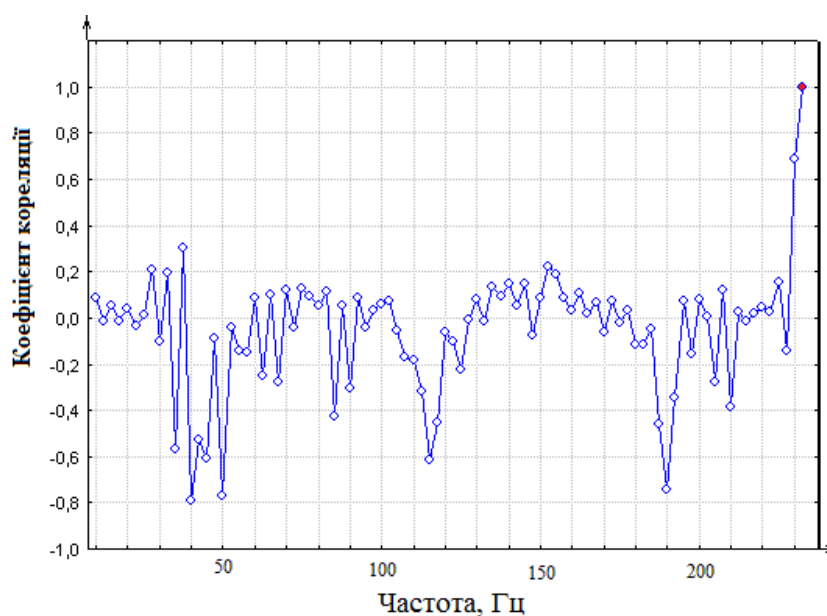
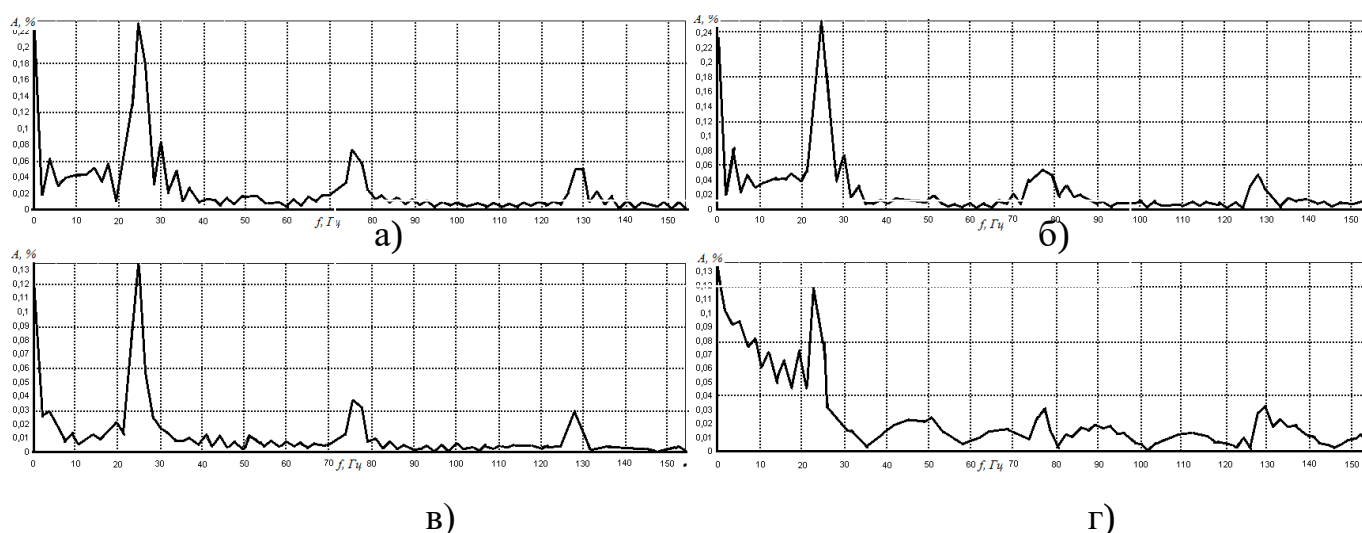


Рис. 3.10. Коефіцієнти кореляції положення заслінки трубопроводу з частотами спектра і густиною пульпи

Для вирішення завдання статистичного аналізу, спрямованого на пошук у спектрі СМАП приводного електродвигуна піків частот, відповідальних за коливання вище описаних елементів конструкції, використовується спектр СМАП, отриманий на працюючому шламовому насосі з пульпою щільністю 1090 кг/м^3 (рис. 3.11).



а – нормальна робота (заслінка відчинена на 100%, щільність пульпи – $1,38 \text{ кг/дм}^3$); б – нормальна робота (заслінка відчинена на 100%, щільність пульпи – $1,40 \text{ кг/дм}^3$); в – аварійна ситуація (тимчасова зупинка колеса); г – аварійна ситуація (аварійне відключення двигуна)

Рис. 3.11. Спектри споживаної миттєвої активної потужності електродвигуна шламового насоса 5-ГРк8 у різних режимах роботи

На цьому прикладі наочно видно теоретично передбачені відповідно до запропонованої імітаційної моделі пікової частоти в 25, і 103–105 Гц. При цьому виділяється пік з частотою 50 Гц: це частота живлячого змінного струму. Те ж походжень мають списи, кратні 50 Гц. Окрім вище описаних піків мають місце списи частот менше 3 Гц, і в діапазоні частот від 4 до 10 Гц. Їх походження пояснюється впливом системи трубопроводів на шламовий насос і, як наслідок, його електродвигун. Для підтвердження цих тверджень проведений багатофакторний дисперсійний аналіз спектра споживаною приводним електродвигуном шламового насоса активної миттєвої потужності.

Багатофакторний дисперсійний аналіз дозволяє оцінювати вплив на змінну, за якою спостерігають (у нашому випадку – на частоту та амплітуду у спектрі) довільного числа незалежних чинників. Проведений регресійний аналіз, що уточнює результати кореляційного, і що дозволяє встановити наявність причинного зв'язку між змінними, та передбачати значення залежних змінних за показниками незалежних змінних, показав результати, що подані в табл. 3.2 і 3.3.

Таблиця 3.2

Таблиця парних кореляцій Пірсона для частоти 2 Гц, щільності пульпи та положення заслінки шламового насоса

	Var2	Густина	Заслінка
Var2	1,00	-0,68	-0,01
Густина	-0,68	1,00	0,69
Заслінка	-0,01	0,69	1,00

Таблиця 3.3

Результати регресійного аналізу для залежної змінної (частота 2 Гц) від незалежних змінних

	β	Ст. похиб. β	B	Ст. похиб. B	t(17)	P-рівень
Intercept			1,19803	0,140724	8,5133	0,000000
Щільність	-1,27909	0,124664	-1,66618	0,162392	-10,2602	0,000000
Заслінка	0,86782	0,124664	0,99243	0,142566	6,9612	0,000002

У табл. 3.2 і 3.3 надано результати кореляційного і регресійного аналізу залежної змінної – частоти 2 Гц від двох незалежних змінних – щільність пульпи і положення заслінки. Аналогічні аналізи були виконані з усіма частотами спектру.

Найбільш показові залежності наведено на рис. 3.12–3.16. Це – співвідношення частот від 0 до 3 Гц з показником щільності пульпи, та залежність частот 32, 35, 45 та 125 Гц із показником відкриття заслінки системи гідротранспорту секції флотації збагачувальної фабрики, де проводились експериментальні дослідження.

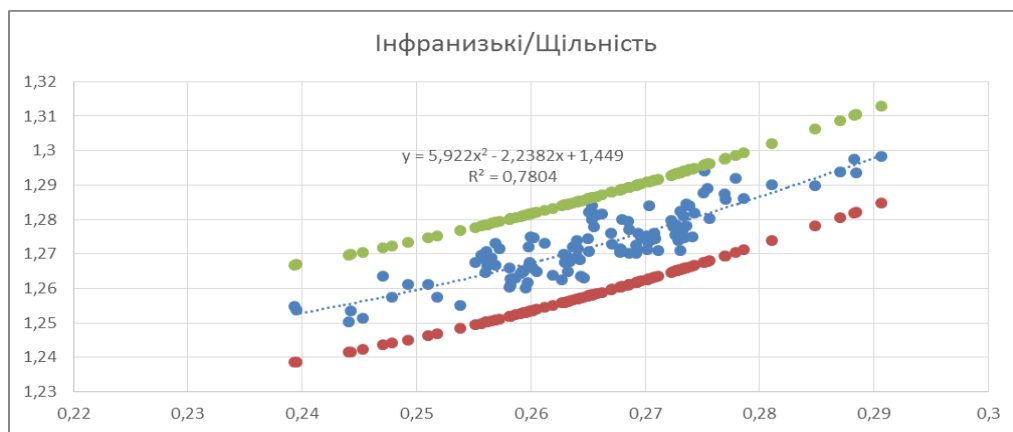


Рис. 3.12. Відношення спектральної амплітуди частот 0–3 Гц до щільності пульпи

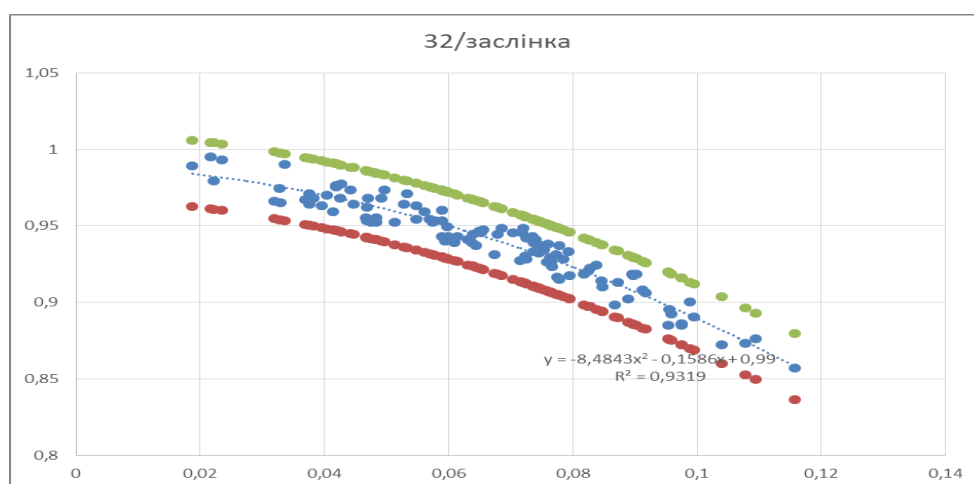


Рис. 3.13. Відношення спектральної амплітуди частоти 32 Гц до ступеню відкриття заслінки

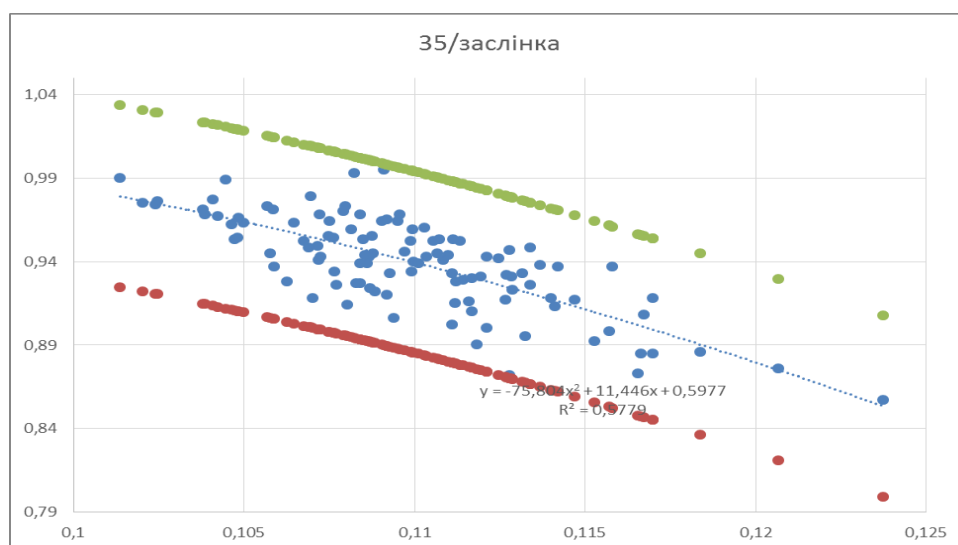


Рис. 3.14. Відношення спектральної амплітуди частоти 38 Гц до ступеню відкриття заслінки

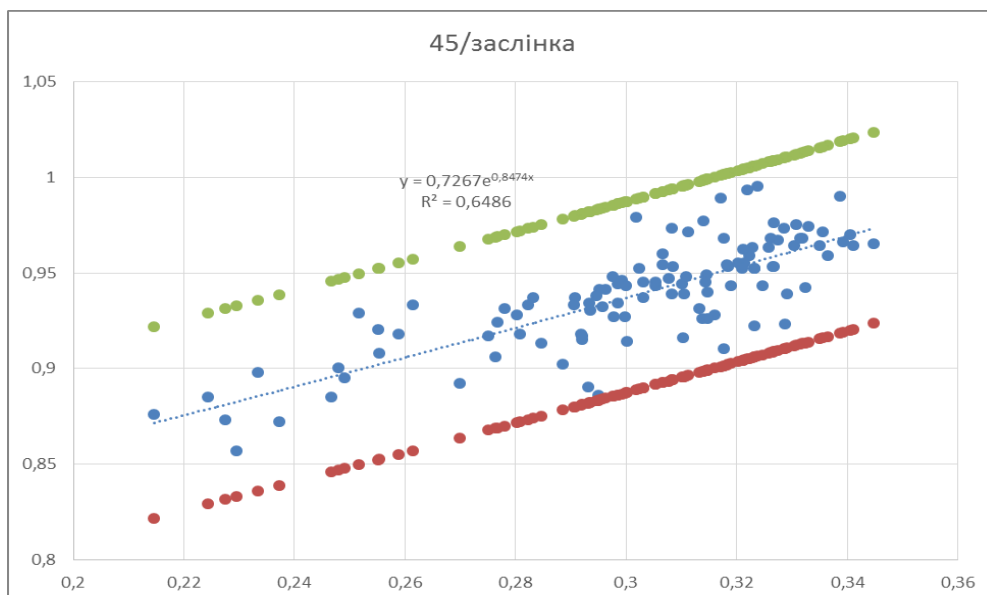


Рис. 3.15. Відношення спектральної амплітуди частоти 44 Гц до ступеню відкриття заслінки

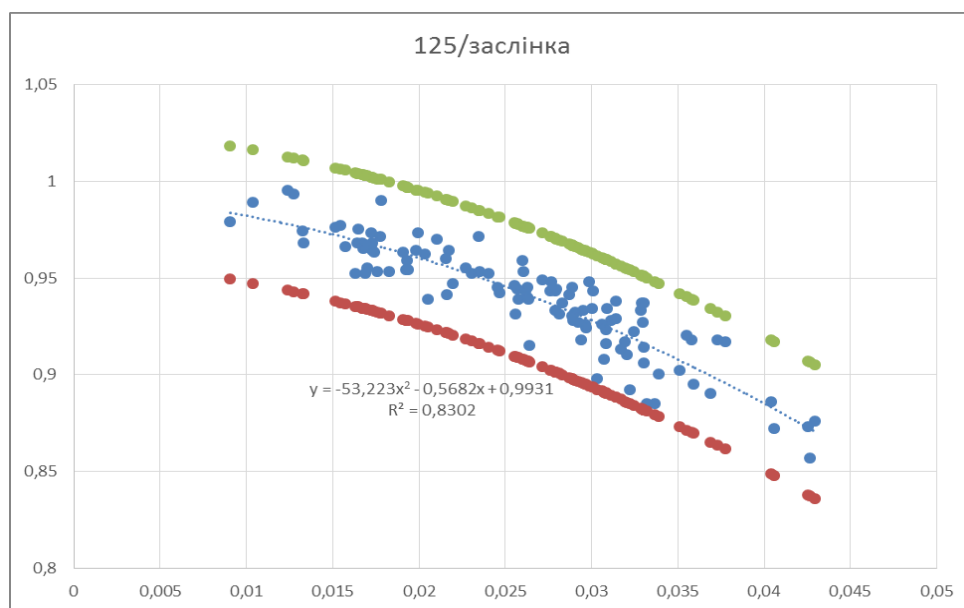


Рис. 3.16. Відношення спектральної амплітуди частоти 125 Гц до ступеню відкриття заслінки

Таким чином, в результаті статистичного та кореляційного аналізу результатів промислових випробувань систем гідротранспорту в процесі роботи були виявлені наступні залежності: більшість частот спектру СМАП приводного

електродвигуна насоса 5-ГРк8 системи гідротранспортування пульпи зворотньопропорційна щільність, а частоти від 0 до 3 Гц прямо пропорційні щільності пульпи, що транспортується, що дає можливість контролю щільності пульпи з швидкістю до 0,1 с, що вище ніж у щільноміра ПР-1027М на порядок; спектр СМАП виразно фіксує механічні коливання системи гідротранспортування, що дає можливість контролю механічних характеристик системи гідротранспорту за показами СМАП; положення заслінки виразно виділяється в зміні ряду характерних частот, що дає змогу контролю і керування за цим чинником. Для залежності амплітуди інфранизьких частот від щільності пульпи розподілення найкраще описується формулою (3.1), 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 (3.2), для якої коефіцієнт детермінації R^2 складає 0,901, межі похибки для яких вказані на рис. 3.12-3.16.

$$y = 5,922x^2 - 2,2382x + 1,449, \quad (3.1)$$

$$y = -889\,769,095x^6 + 4\,937\,533,465x^5 - 11\,408\,284,745x^4 + 14\,048\,091,078x^3 - 9\,723\,532,486x^2 + 3\,586\,875,053x - 550\,913,273. \quad (3.2)$$

3.3. Уточнення моделі електромеханічної системи гідротранспорту гірничо-збагачувального підприємства

Окрім вище описаних залежностей на спектрах СМАП виділялися списи в діапазоні 18–22 Гц. Дослідження параметрів фабричного гідротранспорту ділянки флотації другої збагачувальної фабрики Полтавського ГЗКа показало, що ця аномалія може бути викликана двома причинами: вигинами трубопроводу, або наявністю в трубопроводі чужорідних включень. Схему гідротранспортної системи, подано на рис. 3.17.

Для того, щоб гарантувати, що система трубопроводів вільна від надмірних коливань, необхідно, щоб окремі прольоти трубопроводу не вступали у фазу активного механічного резонансу, породжуваного компресорами, насосами, або – нестационарністю потоку. Для досягнення цієї мети, мають бути розраховані частоти сил збудження та механічних власних частот трубопроводу.

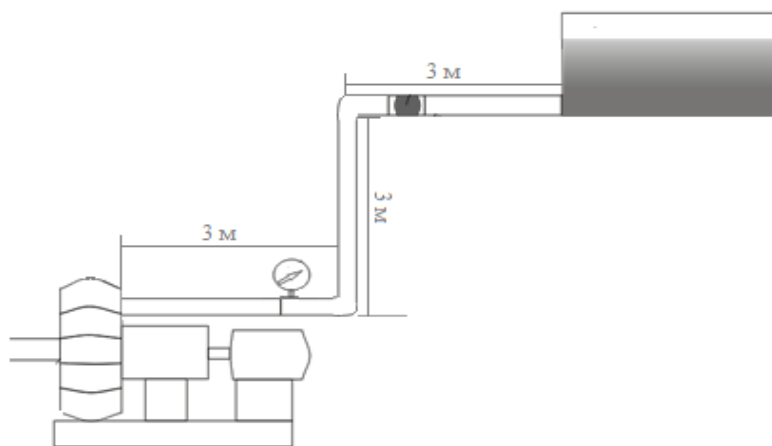


Рис. 3.17. Схема структури гідротранспортної системи другої збагачувальної фабрики Полтавського ГЗКа, відділення флотації

Фактична частота коливань прольотів трубопроводу часто відхиляється від теоретичної частоти, оскільки конфігурації, які існують в реальних фабричних трубопроводах, мають граничні умови, які відрізняються від ідеальних значень. Проте, теоретичні дослідження [37] дають цінну відправну точку для розуміння поведінки вібрації трубопроводів.

Рішення більшості проблем вібрації трубопроводів пов'язані із зменшенням сили збудження, шляхом усунення механізмів зчеплення, або усунення механічних, або пульсаційних резонансів. Найбільш ефективними рішеннями є ті, які усувають резонанси, оскільки коефіцієнт посилення для механічних резонансів, як правило, від 10 до 30.

Модифікації конструкції трубопроводу для вирішення механічних резонансів (оскільки діапазон власної частоти є зворотною функцією квадрата довжини прольоту) є найбільш ефективним способом вирішення проблеми механічного резонансу. Додавання до трубопроводу утримуючих пристроїв, таких

як пірси, підтримка або затиски, для скорочення періоду коливань може бути використано для скорочення вібрацій подібної природи. Схема на рис. 3.17 показала, що в початковій моделі гідротранспортної системи не було враховано реальне положення трубопроводу, яке, як показано в розділі 1.2, здатне впливати на вібрації пульпи, в т.ч. породжувати зміни потужності, що витрачається на перекачування пульпи. Відповідно, введення додаткової ланки в модель, представлену на рис. 2.4, що відповідає за коливання, протікання пульпи, які викликані нерівномірністю, в трубопроводі, здатне пояснити наявність піків активності СМАП електродвигуна шламового насоса.

Для визначення параметрів цієї ланки звернемося до табл. 1.2, де $F_u = 75,8\lambda(D/L_2)$, де $\lambda=23,4$; $D=0,1$; $L=3$, що дає значення частоти вібрації 19,97, тобто повністю підтверджуючи припущення про вібраційну активність, викликану вигином трубопроводу. Тоді формула передавальної функції додаткової ланки буде виражена як формула для коливальної ланки другого порядку

$$W(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1^2}, \quad (3.1)$$

$$\text{де } p_{1,2} = \frac{\xi}{T} \pm j \frac{1}{T} \sqrt{1 - \xi^2} = \alpha \pm j\omega,$$

де α – коефіцієнт загасання, ω – кутова частота коливань, рад/с.

В цьому випадку загальна схема багатомасових систем роторів Джеффкотта-Лавалю, в уточненому варіанті буде подана як рис. 3.18, а загальна електромеханічна схема – на рис. 3.19.

Моделювання системи з додатковою ланкою, що враховує вібраційну активність трубопроводів залежно від їх механічних параметрів, дало підвищення критерію оцінки подібності (2.9) між модельними і реальними даними в середньому на 3 %, що підвищило достовірність моделювання.

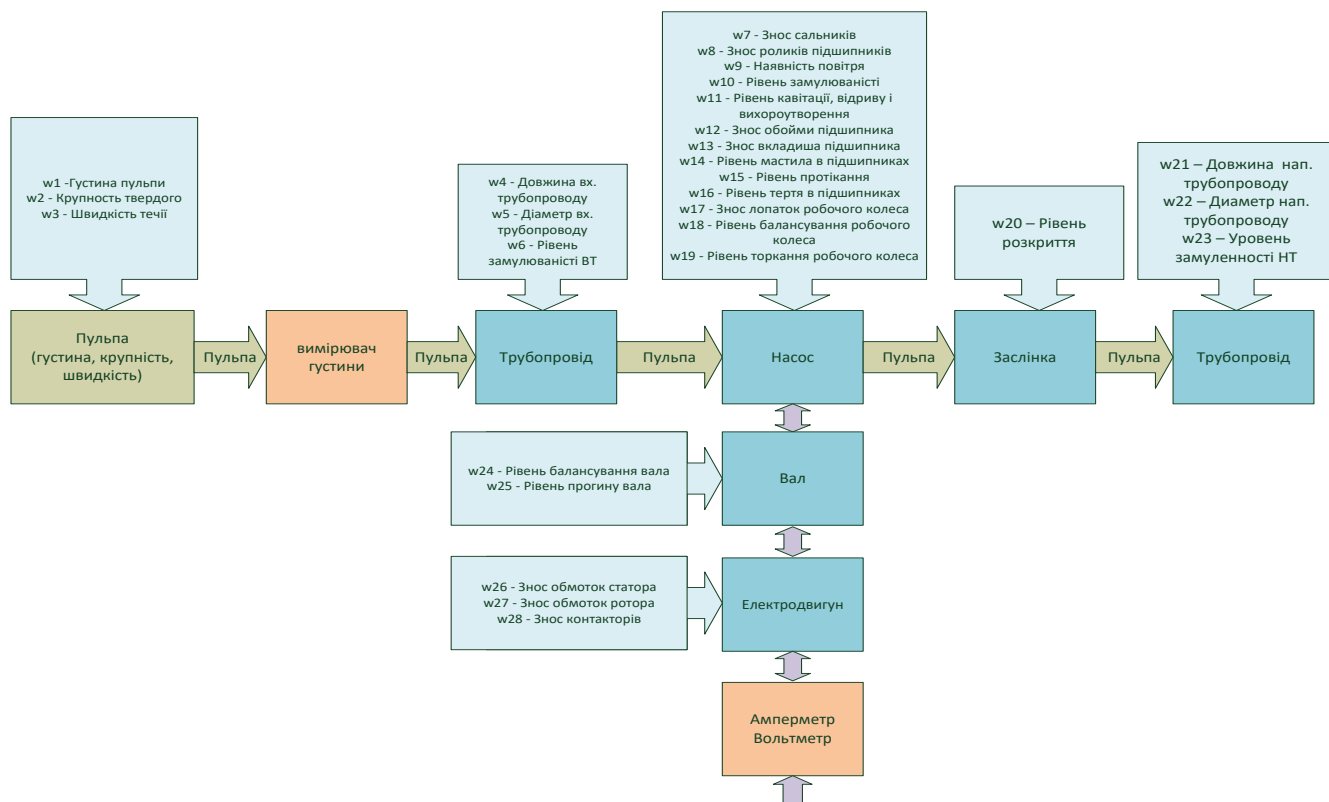


Рис. 3.18. Структурна схема трубопровідного транспорту

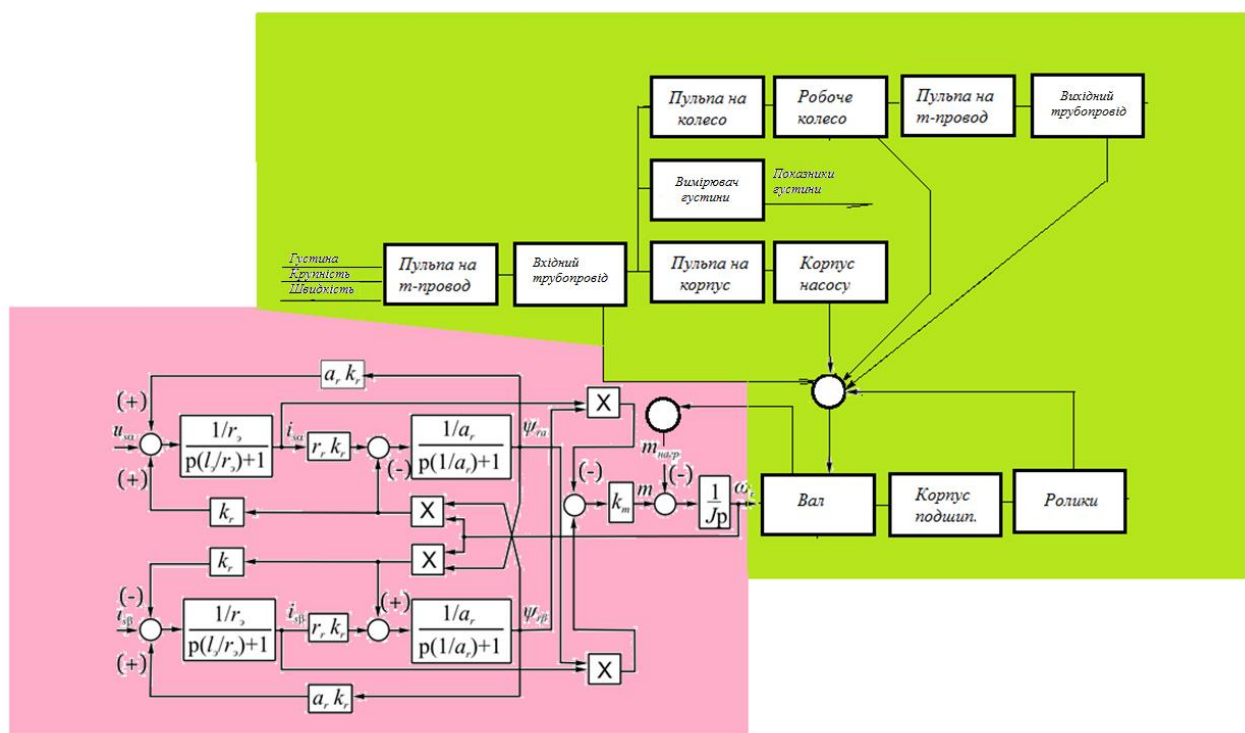


Рис. 3.19. Структурна електромеханічна схема трубопровідного транспорту

3.4. Узагальнений аналіз адекватності моделей внутрішньофабричної гідротранспортної системи

Дані, отримані в результаті дослідження математичних моделей шламового насоса, запропоновані в розділах 2.1, 2.2, і дані, отримані в результаті імітаційного теоретичного моделювання та в результаті промислових експериментів корелювали між собою [134]. Проте, для повної впевненості у відповідності досліджуваних властивостей моделі реальному гірничому агрегату, необхідно провести ряд статистичних досліджень.

По-перше, необхідно переконатися в адекватності моделі, під якою розуміють міру відповідності моделі реальному значенню або об'єкту, для опису якого вона будується. При цьому створювана модель орієнтована, як правило, на дослідження певної підмножини властивостей цього об'єкту. У даному випадку оцінки адекватності моделі шламового насоса було проведено більше 30 десятихвилинних експериментальних циклів знімання даних, отриманих в робочих умовах ділянки флотації другої збагачувальної фабрики Полтавського ГЗКу (додаток Б), для яких були обчислені усі вище описані параметри та оцінки. Оскільки основним досліджуваним елементом були частотні спектри сигналів СМАП, то для кожної з частот було вираховане середнє значення функції відгуку, незміщена оцінка дисперсії функції відгуку і оцінка дисперсії відтворюваності, величини яких коливалися від 0,001 до 10^{-9} . Оцінка дисперсії відтворюваності середнього значення відгуку склала 0,0377.

Необхідною умовою застосування методу найменших квадратів для розрахунку оцінок коефіцієнтів моделі є однорідність оцінок дисперсії відтворюваності середнього значення функції відгуку в усіх точках плану. Тому обов'язковим етапом обробки є перевірка статистичної гіпотези про однорідність сукупності дисперсій відтворюваності. В умовах різної кількості дослідів в точках плану застосовані критерії Фішера та Бартлетта.

В процесі експериментальних досліджень були зняті покази з працюючих шламових насосів (додатки Б, Г). Експертом показники були розділені на класи

«Нормальний режим», «Передаварійний режим» і «Аварія». З кожного класу були виділені випадковим чином показники (рис. 3.20), на основі яких і було проведено статистичний аналіз адекватності моделі.

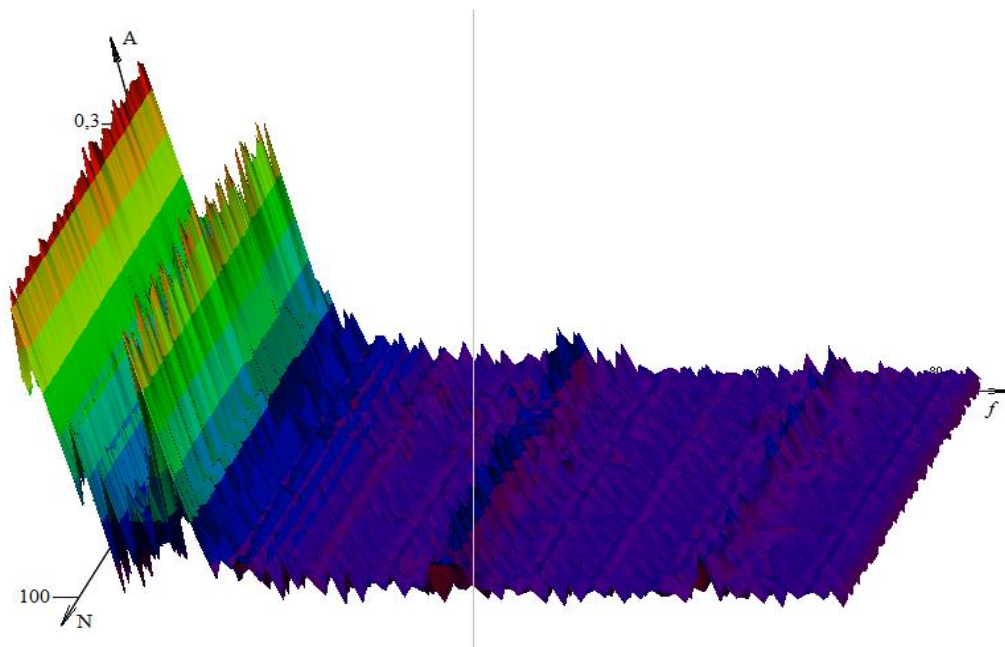


Рис. 3.20. Результати вибірки спектрів СМАП в нормальному режимі функціонування ВГТС

Для перевірки адекватності моделі шламового насоса були виконані такі дії:

1. Вираховано спектр гармонійних коливань енергоінформаційних показників моделі шламового насоса.

2. Експериментально отримані в умовах Полтавського ГЗКа показники СМАП, а також положення заслінки шламового насоса та щільності пульпи були піддані фільтрації від шумів.

3. Відфільтровані значення і значення, отримані за допомогою моделі, були піддані кореляційному і спектральному аналізу.

4. Виконані перевірки однорідності за критеріями Фішера та Бартлетта, які показали однорідність оцінок дисперсії відтворюваності, для критерію Фішера оцінка склала 2,59; для критерію Бартлетта перевірка показала, що цей коефіцієнт значущий на рівні менше 0,02, що свідчить про надійність обчислення кореляційної матриці.

5. На основі отриманих раніше даних була вироблена перевірка адекватності запропонованих моделей шляхом зіставлення дисперсії відтворюваності середнього значення функції відгуку $\sigma^2(y)$ та дисперсії адекватності.

У результаті вище описаних дій були отримані такі результати: оцінка адекватності моделей шламового насоса, описаних в розділі 2 та експериментальних даних, отриманих в результаті експерименту, приведеному в [133, 134] та додатках В і Г, показала, що оцінка дисперсії адекватності моделі істотно менша табличного значення, що підтверджує високу точність збіжності теоретичних і експериментальних даних і адекватність запропонованої моделі.

Проведений в пакеті MATLAB аналіз отриманих даних показав, що вибрана модель з високою точністю та достовірністю описує істинну залежність.

Висновки до розділу 3

На основі проведених експериментальних досліджень та в результаті аналізу отриманих даних були сформовані наступні висновки:

1. Проведені експериментальні дослідження, підтвердили запропоновані в розділі 2 моделі шламового насоса та системи гідротранспорту, а також запропоновані там же методи контролю та діагностування за даними СМАП приводного електродвигуна шламового насоса. Для реалізації методу контролю за показниками миттєвої активної споживаної потужності приводного електродвигуна шламового насоса спільно з щільністю пульпи і положеннями заслінки запропонована методика розробки системи підтримки ухвалення рішень для керування технологіями гідротранспорту на гірничих підприємствах. За цією методикою проведені експериментальні дослідження в умовах Полтавського ГЗК.

2. Проведений кореляційно-спектральний аналіз результатів досліджень, показав залежності частот спектра СМАП приводного електродвигуна від параметрів системи гідротранспорту, а саме: встановлена прямо пропорційна залежність ультранизких частот (до 3 Гц) спектра активної миттєвої потужності

двигуна шламового насоса від щільності пульпи, що транспортується, і залежність частот спектру (32, 38, 44 і 125 Гц) від положення заслінки.

3. Аналіз отриманих експериментальних спектрів миттєвої активної споживаної потужності показав необхідність коригування моделей, та введення додаткових ланок, що відповідають за коливання трубопроводів в залежності від пульпи, що протікає в них. Такі ланки дають змогу контролювати стан трубопроводів через моделювання та контроль по показам споживаної миттєвої активної потужності, що значно полегшує загальний контроль гідротранспорту збагачувальної фабрики.

4. Аналіз адекватності розроблених моделей системи гідротранспорту, як об'єкту автоматизації, отриманим в результаті експерименту даним, показав, що коефіцієнт детермінації складає 0,97. Це повністю задовольняє вимогам, що пред'являються до точності моделі, яка описує промислові системи.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ ПРОЦЕСУ ВНУТРІШНЬОФАБРИЧНОГО ГІДРОТРАНСПОРТУВАННЯ

4.1. Розробка ситуаційної моделі ухвалення керуючих рішень в умовах інформаційної невизначеності

Технологічний процес гідротранспортування має велику кількість інформаційних параметрів, аналіз яких ускладнений зважаючи на велику кількість розглянутих раніше елементів, станів і їх ознак. Для вирішення завдання аналізу поточного стану об'єкта досліджень запропоновано використовувати теоретико-множинний підхід.

Теоретико-множинний підхід припускає аналіз множини інформаційних повідомлень, об'єктів і тому подібне з точки зору їх кількісних ознак. Зміст пошуку якісного аспекту інформації полягає в тому, щоб виділяти, вивчати і досліджувати характеристики множини повідомлень у зв'язку з якісними моментами його складників. Об'єктом спостереження є технологічний процес гідротранспортування, що включає як підоб'єкти систему гідротранспорту та пульпу, що транспортується, а також множина відібраних для спостереження параметрів процесу та підоб'єктів. Кожній з властивостей об'єкта призначається змінна, за допомогою якої підсумовується зміна проявів властивості. Множині спостережуваних проявів властивості ВГТС ставиться у відповідність множина значень змінною

$$D:S_i=[S_{ij}, j=\{1, N\}]\rightarrow X_i=[X_{ij}, j=\{1, N\}], \quad (4.1)$$

де S_i – i -а властивість;

X_i – змінна.

Представимо процес гідротранспортування у вигляді множини

$$S=(X, T, R, Z), \quad (4.2)$$

де X – множина змінних властивостей процесів;

T – множина параметрів;

R – відношення на множині X і T ;

Z – мета досліджень. Як Z визначимо критерій «функціонування в працездатному стані».

Множину моментів часу t , в яких розглядається функціонування системи, позначимо як T , $t \in T$. Визначимо функціонування системи в безперервному часі.

Припустимо, що вхідний сигнал $X_1 \in X_i$, де X_i – задані множини ($i=1, n$); $x_\emptyset \in X$; де $x_\emptyset$ – відсутність сигналу в момент t .

Розглядаючи відображення $x=K(t)$, що зіставляє кожному $t \in T$ деякий сигнал $x \in X$ (відображення: $f:T \rightarrow X$), прийmemo T^K як множина моментів часу $T^K \subset T$, таке, що для будь-кого $t' \in T^K$ справедливо $K(t_1) \neq x_\emptyset$. Приймемо, що $x=K(t)$ – вхідний процес системи, а сукупність упорядкованих пар (t', x) для усіх $t' \in T^K$ (де $x=K(t')$) – вхідне повідомлення. В цьому випадку для завдання конкретного вхідного процесу $x=K(t)$, достатньо вказати відповідне йому вхідне повідомлення $(t, x_K)_T$.

Для кінцевої множини $T^K \cap (t_1, t_2]$, наприклад $t_1, t_2, \dots, t_k$, вхідне повідомлення має вигляд $(t_1, x_1; t_2, x_2; \dots; t_k, x_k)$. Тоді сукупність впорядкованих пар (t^*, x^*) , можна розглядати як уривок $(t, x_l] t_1 t_3$, деякого повідомлення $(t, x_l -) t$, що утворився в результаті зчленування уривків $(t, x_{K_1}] t_3$ і $(t, x_{K_2}] t_3 t_2$. Зчленування будь-якого числа уривків вхідних повідомлень з множини $\{(t, x_l) t\}$ є уривок деякого вхідного повідомлення, що належить цій множині.

Позначимо вихідні сигнали $y \in Y$, де Y – множина вихідних сигналів системи. Вихідний сигнал, що видається системою у момент часу $t \in T$, позначається $y(i)$. Якщо вихідний сигнал y описується набором характеристик $y_1, y_2, \dots, y_m$, таких, що $y \in Y_j$, $j=1, m$, Y_j – задані множини, то прямий добуток $Y=Y_1 \times Y_2 \times \dots \times Y_m$ є простором вихідних сигналів системи. За аналогією з вхідним процесом позначимо вихідний процес $y=O(t)$, а також визначимо вихідне повідомлення $(t, y_O)_T$ і його уривок $(t, y_O] t^2$ на напівінтервалі $(t_1, t_2]$. В цьому випадку для системи

S множина її станів St називають множиною або об'єктом глобальних станів системи, якщо функція $R:(X \times St) \rightarrow Y$ така, що

$$((x, y) (S(((z)[R(x, y)=y. \quad (4.3)$$

Тоді елементи множини $st \in St$ є глобальними станами системи, а R називається глобальною реакцією системи S .

Стосовно ВГТС, як вхідні сигнали визначимо такі як: показники щільності пульпи (P) і положення регулюючої заслінки (Zs) на вході у ВГТС, а як вихідні – значення амплітуд нормованого спектру СМАП приводного електродвигуна шламового насоса (PS), узяті на інтервалі 0–250 Гц. Як обмеження приймемо такі z , в яких x або y набувають заборонених значень, перерахованих в розділах 1 і 2.

У разі отримання уривка вхідного повідомлення доцільно перейти до завдання керування складним об'єктом за ситуаційною моделлю ухвалення керуючих рішень. В цьому випадку формальна постановка завдання буде визначена як

$$Z_i; D_i \xrightarrow{U_k} D_j \quad (4.4)$$

де Z_i – поточна повна ситуація;

D_i, D_j – ситуації;

U_k – керуюча дія.

Поточна ситуація, що виникла у момент часу τ , описується теоретико-множинним способом таким чином

$$D_\tau = \{P_\tau, Zs_\tau, PS_\tau, Op_\tau, Mon_\tau, HS_\tau\} \quad (4.5)$$

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.

Слід врахувати, що опис (4.5) є загальним, а для опису взаємодії об'єктів і суб'єктів предметної області застосовуються псевдофізичні логіки (ПФЛ), що описуються за допомогою мови ситуаційного керування (МСК), до яких можна віднести часову логіку, логіку дій, просторові логіки і тому подібне. Згідно методології ситуаційного керування, головною одиницею МСК являється проста ядерна конструкція – трійка виду (xry) , де x і y – поняття, r – відношення або дія.

Прийmemo $B = \{b_1, \dots, b_n, \mu_b(b_1), \mu_e(b_1), \dots, \mu_b(b_n), \mu_e(b_n)\}$, де B – множина подій, b_i – власне подія, $\mu_b(b_1)$ і $\mu_e(b_1)$ – маркери початку і кінця події b_1 ; $R = \{r_{11}, r_{12}, \dots, r_{kp}\}$, де R – множина стосунків між подіями; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m, \dots\}, t_1 < t_2 < \dots < t_{m-1} < t_m < \dots$, де T – множина моментів часу на відносній тимчасовій шкалі.

Наслідуючи цю термінологію, запропонований наступний опис ситуації «Прогин вала». Вводяться наступні 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

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 в термінах мови ситуаційного керування записується як

$$\begin{aligned} B_{ne} = & (b_1^{HS} r_6 b_2^{HS}) \cup (b_1^{HS} r_6 b_3^{HS}) \cup (b_2^{HS} r_6 b_4^{HS}) \cup (b_2^{HS} r_6 b_5^{HS}) \cup (b_3^{HS} r_6 b_6^{HS}) \cup \\ & \cup (b_3^{HS} r_6 b_8^{Mon}) \cup (b_3^{HS} r_6 b_{10}^{Mon}) \cup (b_2^{HS} r_6 b_7^{Mon}) \cup (b_2^{HS} r_6 b_9^{Mon}) \cup \\ & \cup (b_8^{Mon} r_6 b_{12}^{Op}) \cup (b_7^{Mon} r_6 b_{12}^{Op}) \cup (b_9^{Mon} r_6 b_{11}^{Op}) \cup (b_{10}^{Mon} r_6 b_{11}^{Op}) \end{aligned} \quad (4.6)$$

Також, згідно тієї ж термінології запропонований наступний опис ситуації «Знос роликів підшипників». Вводяться такі умовні позначення:

b_{12}^{HS} – знос роликів підшипників;

b_2^{HS} – підвищена вібрація агрегату;

b_3^{HS} – перегрівання підшипників;

b_6^{HS} – вихід підшипників з ладу;

b_{13}^{Mon} – збільшення амплітуди спектральною складовою СМАП електродвигуна насоса на частоті обертання роликів;

b_{14}^{Mon} – перевищення гранично допустимої амплітуди спектральних складових СМАП електродвигуна насоса на частотах, кратних частоті обертання роликів;

Такий процес в термінах МСК записується як

$$\begin{aligned} B_{up} = & (b_{12}^{HS} r_6 b_2^{HS}) \cup (b_{11}^{HS} r_6 b_3^{HS}) \cup (b_2^{HS} r_6 b_4^{HS}) \cup (b_3^{HS} r_6 b_6^{HS}) \cup (b_{13}^{HS} r_6 b_8^{Mon}) \cup (b_3^{HS} r_6 b_{10}^{Mon}) \cup \\ & \cup (b_{14}^{HS} r_6 b_7^{Mon}) \cup (b_9^{Mon} r_6 b_{11}^{Op}) \cup (b_{10}^{Mon} r_6 b_{11}^{Op}) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Аналогічним чином описані інші аварійні ситуації, викладені в попередніх роботах [136, 137].

Для дослідження обрана модель опису станів процесу гідротранспортування і системи гідротранспортування в термінах теоретико-множинного підходу із заданими структурними властивостями [140].

1. Визначена необхідна номенклатура процесу гідротранспортування і структура зв'язків для організації повного контролю процесу гідротранспортування на гірничо-збагачувальному підприємстві.

2. При дослідженні типової структури процесу гідротранспортування, були досліджені правила декомпозиції і композиції для формування структур нових складних процесів.

3. Розроблена структура інформаційної підсистеми підтримки ухвалення керуючих рішень, за допомогою системи ситуаційного керування.

4.2. Розробка автоматизованої системи керування для мережі внутрішньофабричного гідротранспортування на основі методу прогностичної моделі керування

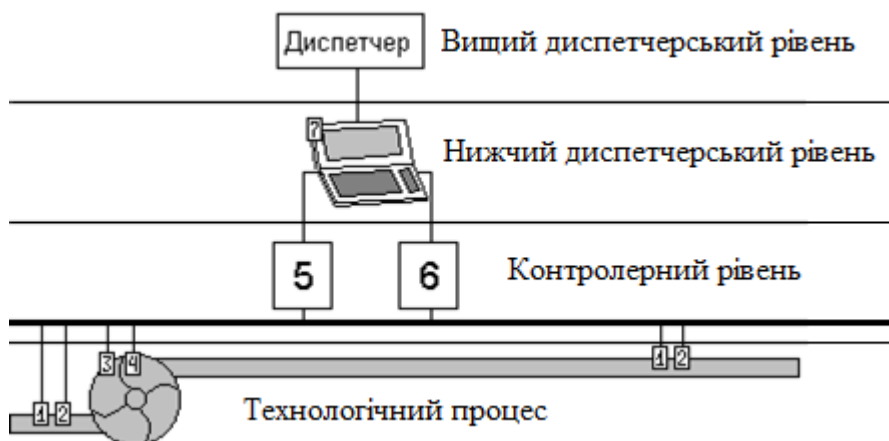
Нині в транспортній галузі до 80 % аварій відбуваються з вини людського чинника, тобто необхідно максимально зменшити його вплив створенням надійних систем підтримки ухвалення рішень [141].

Завданням автоматизованої системи підтримки ухвалення рішень, контролюючої технологічний процес внутрішньофабричного гідротранспортування пульпи, є технічне та технологічне діагностування об'єкту, протоколювання його роботи та комунікації з оператором, забезпечення підвищення продуктивності праці диспетчерської служби, достовірності її рішень та керівних дій.

Для розробки автоматизованої системи гідротранспортної мережі гірничо-збагачувального підприємства визначені принципи функціонування та аналізу подібної системи. Як було показано попередніми дослідженнями [131, 134], для контролю стану гідротранспортної системи можливе використання аналізу

енергоінформаційних сигналів в сукупності з аналізом показників датчиків стану пульпи.

Таким чином, для побудови автоматизованої системи, контролюючої роботу гідротранспортної мережі гірничо-збагачувального підприємства, запропонована функціонально-технічна схема, представлена на рис. 4.1.



1 – датчик тиску пульпи, 2 – датчик густини пульпи, 3 – датчик СМАП насоса, 4 – система керування швидкістю насоса і заслінками системи гідротранспорту, 5 – контролер попередньої обробки сигналів, 6 – блок керування технологічним процесом, 7 – система обробки сигналів

Рис. 4.1. Функціонально-технічна схема системи підтримки ухвалення рішень

З схеми (рис. 4.1) видно, що на трубопроводі встановлені датчики тиску та густини пульпи, а також датчик СМАП на приводному електродвигуні шламового насоса, які забезпечують обмін даними з пристроями зв'язку з об'єктом, тобто з промисловими контролерами та платами введення/виводу. Зв'язок датчиків з системою обробки сигналів здійснюється за протоколом послідовної передачі даних RS-485.

Підсистема обробки сигналів є промисловим комп'ютером підвищеної надійності, на якому встановлено програмне забезпечення, здатне обробити та

розпізнати інформаційні сигнали з датчиків, а потім за підсумками розпізнавання запропонувати диспетчерові найбільш прийнятний варіант подальших дій.

Для цього програмне забезпечення системи підтримки ухвалення рішень у своєму складі має наступні компоненти: базу даних з швидким доступом; дружній користувачеві інтерфейс; підсистему розпізнавання сигналів, що надходять з датчиків; сигнальну підсистему сповіщення про події; підсистему диспетчерського дистанційного керування.

Оскільки завдання аналізу та керування автоматизованою системою гідротранспорту гірничих і гірничо-збагачувальних підприємств відноситься до важкоформалізуємих завдань, то найкращим вибором системи аналізу сигналів є система, побудована на принципі аналізу прикладів сигналів із застосуванням методів штучного інтелекту [142].

Таким чином, для вирішення цього наукового завдання необхідно побудувати програмно-апаратний комплекс, що об'єднує у своєму складі усі необхідні компоненти. При цьому, важливою вимогою до системи автоматизованого керування є компенсація власної динаміки гірничого електромеханічного комплексу із забезпеченням найкращого відтворення за середньоквадратичним критерієм заданої ступінчастої дії [143]. Виконане в системі MATLAB моделювання ПД-контролерів за моделлю, що керується (рис. 2.4), та внесенням обурень подано на рис. 4.2–4.6.

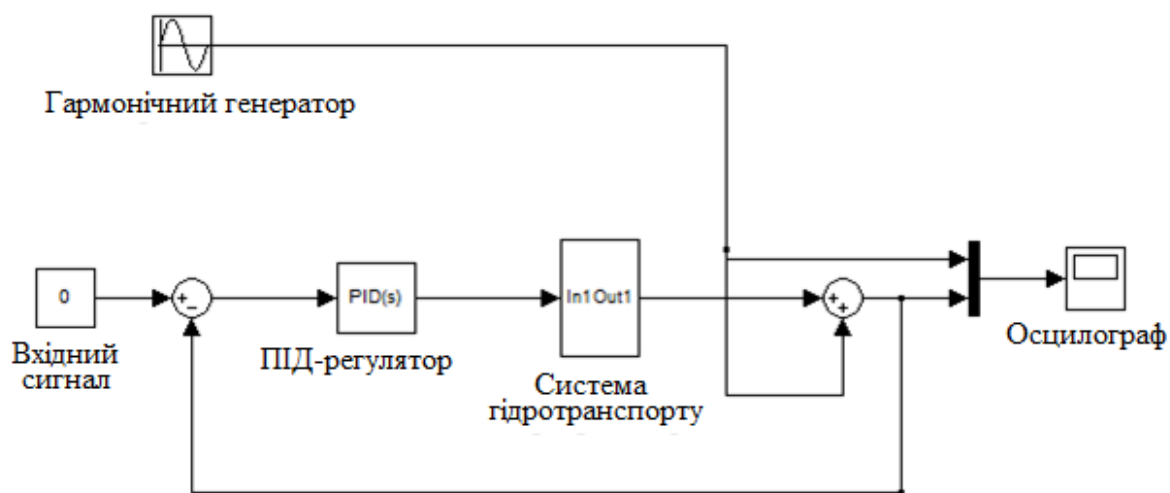


Рис. 4.2. Схема моделювання ШН з ПД-регулятором

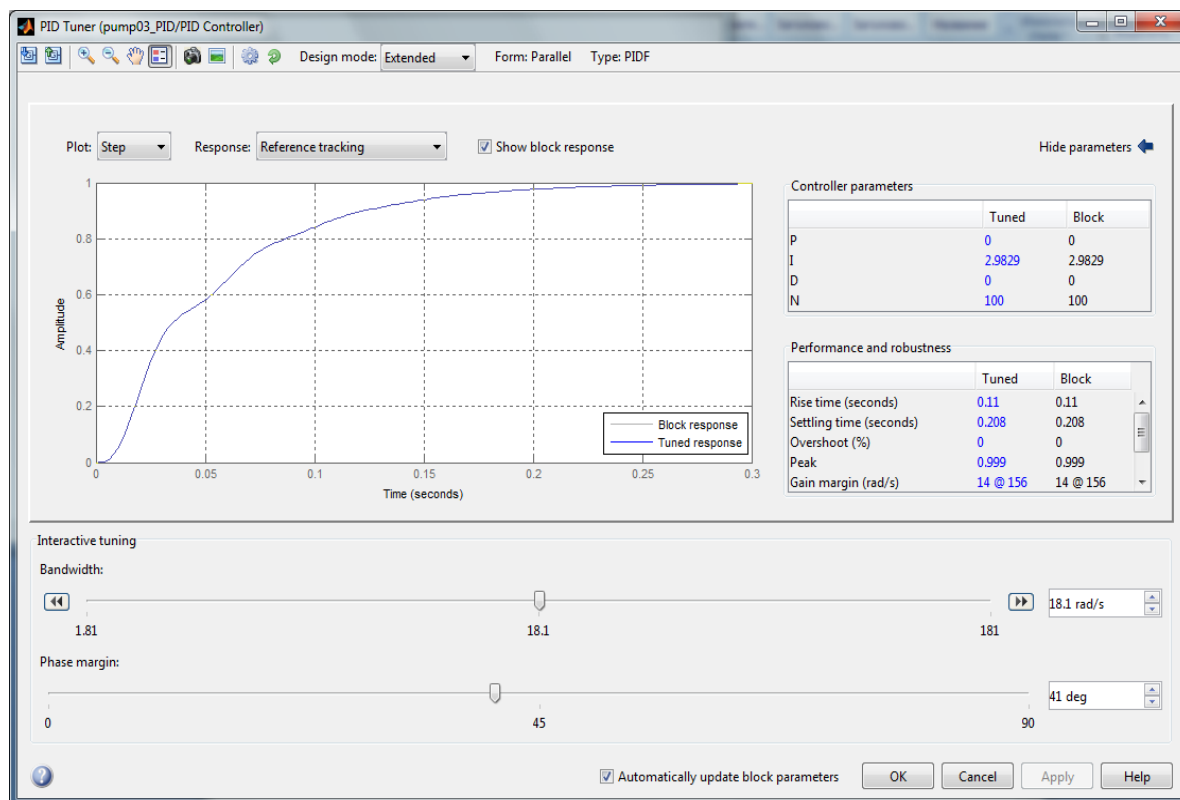


Рис. 4.3. Реалізація ПД-регулятора для схеми 4.2 і його параметри

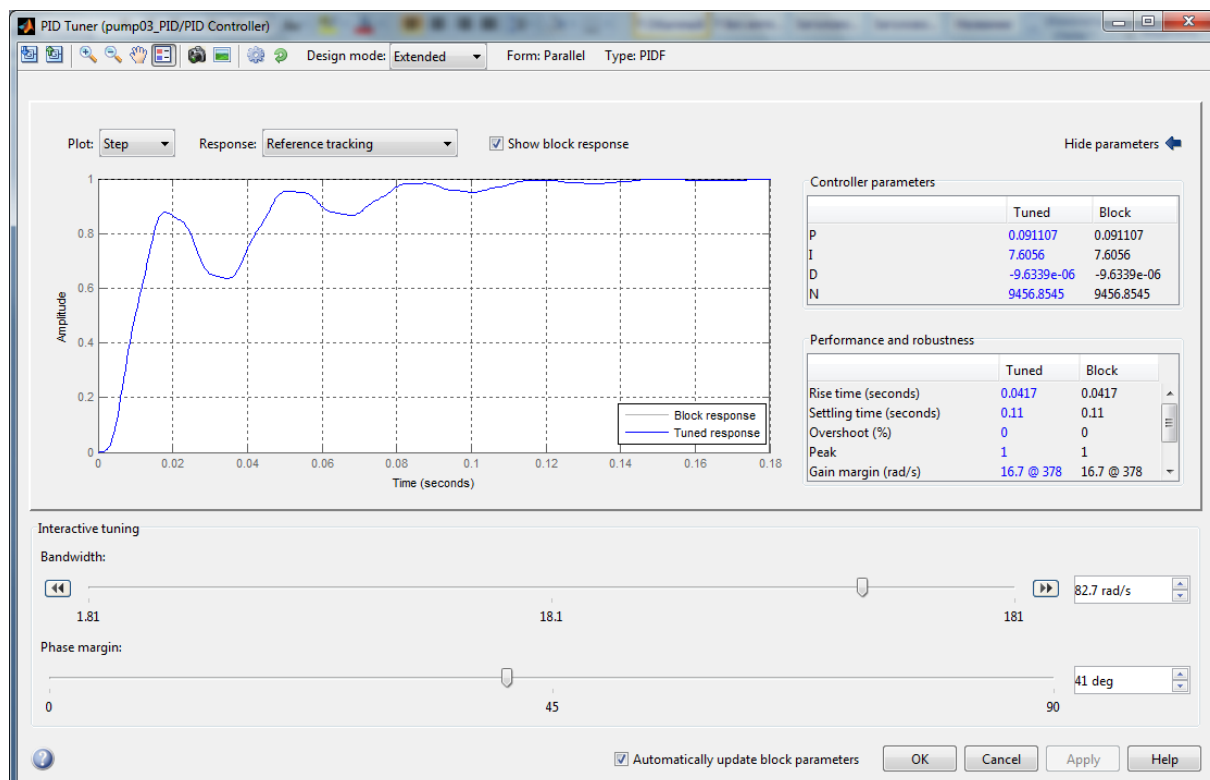
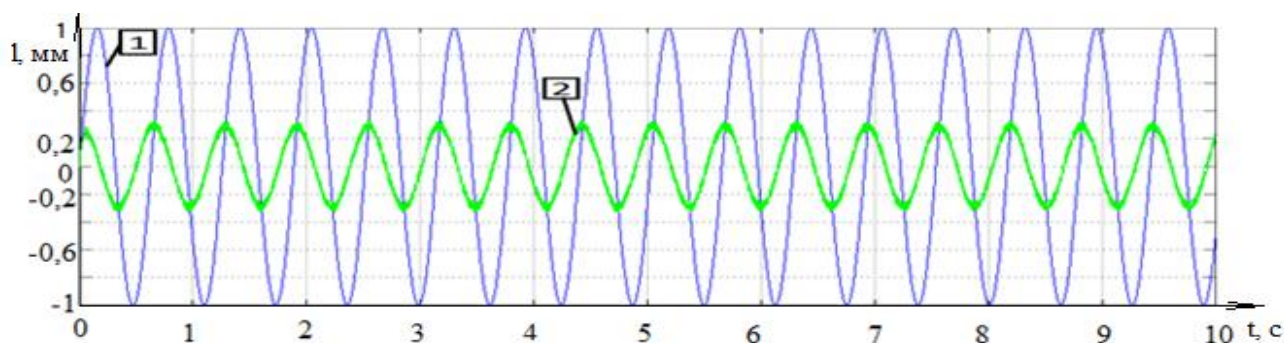
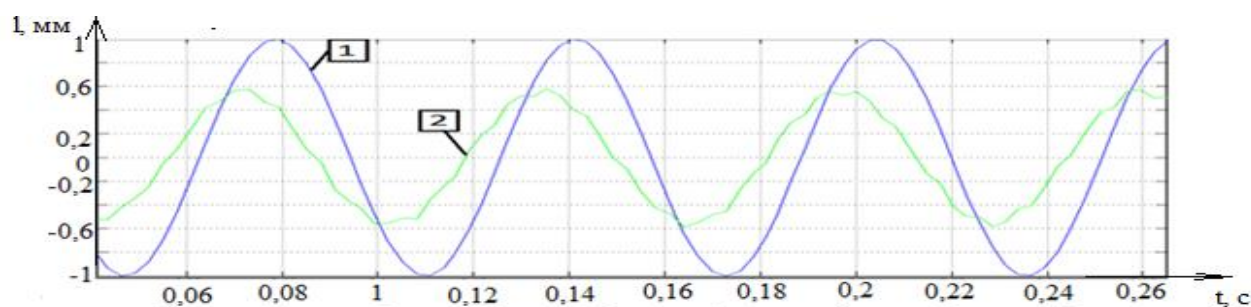


Рис. 4.4. Реалізація ПД-регулятора для схеми 4.2 і його параметри



1 – збурення, 2 – вихідне значення зміщення ротора

Рис. 4.5. Регулювання ПІД-регулятором. Частота 1,5 Гц



1 – збурення, 2 – вихідне значення зміщення ротора

Рис. 4.6. Регулювання ПІД-регулятором. Частота 100 Гц

Контроль за прогностичною моделлю керування (ПМК) використовує: вбудовану динамічну модель процесу; історію минулих керуючих рішень; функцію оптимізації витрат J над горизонтом передбачення, для обчислення оптимальних керівних дій. Структура алгоритму заснована на попередньому знанні моделі і незалежності від неї. Очевидно, що отримувана вигода залежатиме від відмінностей існуючих між реальною системою і її використаною моделлю.

ПМК заснований на оптимізації, що повторюється, по кінцевій межі моделі установки. Стан об'єкта в часі визначається вибірками, для кожної з яких обчислюється стратегія мінімізації витрат (по чисельному алгоритму мінімізації) для часової межі в майбутньому $(t, t+T)$. Застосовується тільки перший крок стратегії контролю, після чого стан об'єкта визначається знову, і для нього обчислюється нова стратегія. Закон керування (рис. 4.7) в даному випадку легко реалізується та вимагає малої кількості обчислень, його вивід є більш

комплексним, ніж у класичних ПІД-регуляторів. Алгоритм ПМК-системи, вживаної для автоматизації ВГТС, подано на рис. 4.8.

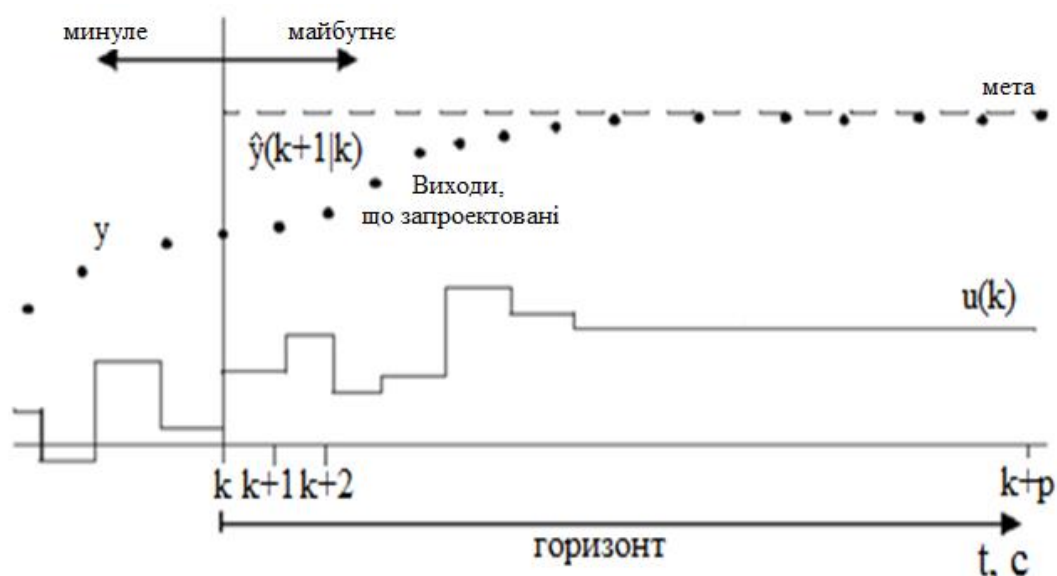


Рис. 4.7. Закон керування ПМК

У разі автоматизації ВГТС розглядається така структура: ШН приводиться в рух електроприводом, перед яким встановлений ПМК-контролер. Зворотний зв'язок від ШН поступає на вхід контролера. Також враховуються збурення моделі та збурення ШН.

Збурення описані як проста синусоїда з частотою, рівній частоті обертання робочого колеса ШН. Шум вимірів змодельований, як незважене хвилювання. Для моделювання потрібні такі змінні: привід і ШН – моделі в кроковому форматі ПМК, використовуваному для оцінки стану в контролері ПМК.

Для будь-якого передбачуваного набору поточних та майбутніх керівних дій $\Delta u(k)$, $\Delta u(k+1)$, ..., $\Delta u(k+m-1)$ майбутня поведінка виходів процесу $y(k+1|k)$, $y(k+2|k)$, ..., $y(k+p|k)$ може бути передбачене горизонтом p . m поточних і майбутніх дій ($m \leq p$), що керують, обчислюються для мінімізації квадратичної мети форми (4.8)

$$\min_{\Delta u(k) \dots \Delta u(k+m-1)} \sum_{l=1}^p \Gamma_l^y (y(k+l|k) - r(k+l))^2 + \sum_{l=1}^m \Gamma_l^u (\Delta u(k+l-1))^2, \quad (4.8)$$

де i – матриці вагів для обчислення окремих компонентів u і y на певних проміжках часу майбутнього;

$r(k+l)$ – вектор майбутніх еталонних значень (уставки).

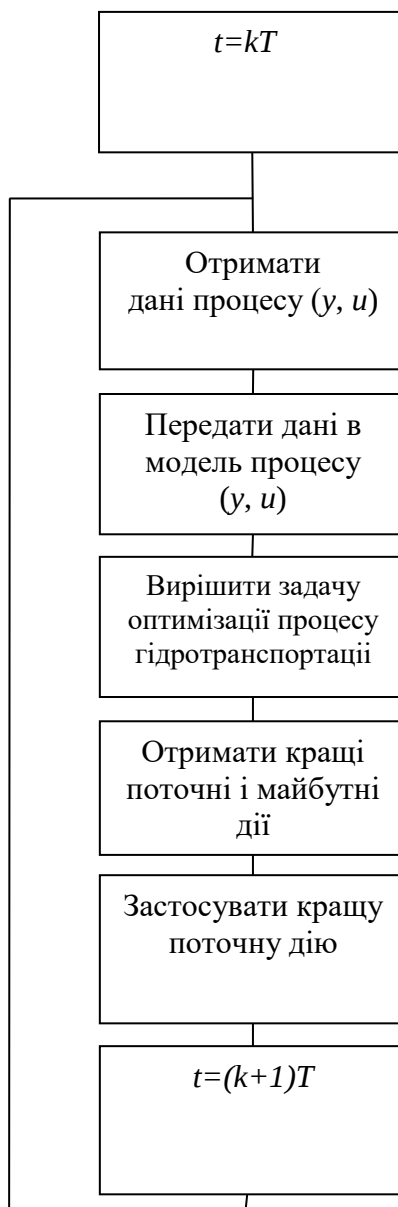


Рис. 4.8. Алгоритм функціонування ПМК-системи, вживаної для автоматизації ВГТС

Прогнозовані виходи процесу $y(k+1|k)$, ..., $y(k+p|k)$, залежать від поточного виміру $\hat{y}(k)$ і від припущень, які розраховуються, виходячи з незмірних порушень і вимірів шуму, що впливають на виходи.

Модель розрахована в системі MATLAB за допомогою системи MPCToolbox. Ця система працює з моделями в просторі станів, який є поодинокую матрицею, що містить матриці простору станів F , G , C , D і деяку додаткову службову інформацію (рис. 4.9).

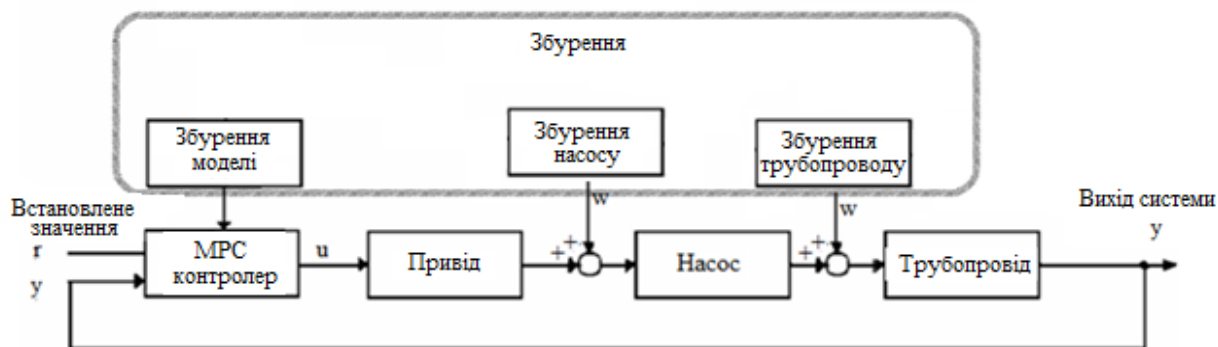


Рис. 4.9. Схема замкнутої системи з МПК-регулювальником

Загальним виразом лінеаризованого інваріанту дискретного часу в просторі станів, використовуваному в MPCToolbox, є вирази (4.9)

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Phi x(k) + \Gamma_u u(k) + \Gamma_d d(k) + \Gamma_w w(k); \\ y(k+1) &= \bar{y}(k) + z(k) = Cx(k) + D_u u(k) + D_d d(k) + D_w w(k) + z(k), \end{aligned} \quad (4.9)$$

де x – вектор з n станів змінних;

u – представляє n_u керованих змінних;

d – представляє n_d вимірюваних, але вільних до змін змінних (вимірювані обурення);

w – представляє n_w невимірюваних змінних, що вільно змінюються;

y – вектор n_y виходів об'єкта керування;

z – вимір шуму;

Φ і Γ – матриці постійних відповідних розмірів.

Змінна $\tilde{y}(k)$ є виходом об'єкта без додавання шуму. Матриця Γ визначається як

$$\Gamma = [\Gamma_u \ \Gamma_d \ \Gamma_w]; D = [D_u \ D_d \ D_w]. \quad (4.10)$$

Для подання шламowego насоса у вигляді системи роторів Джеффкотта-Лавалля припускаємо, що кожен рухомий елемент механізму представлений у вигляді ротора Джеффкотта-Лавалля, сполученого з сусідніми елементами пружним з'єднанням.

Як модель приводу приймається модель, розроблена на основі технічної документації на ШН [18], передавальна функція (4.11)

$$A(s) = \frac{2474s + 3.53^6}{s^2 + 1.529s + 98565}. \quad (4.11)$$

Як обурення ШН використовуються синусоїдальні обурення на частоті, рівній частоті роботи насоса, тобто 25 Гц. Тоді передавальна функція для блоку обурень насоса буде виражена як (4.5), а результати моделювання звена (4.12) реакції електродвигуна ШН на одиничну ступінчасту дію подані на рис. 4.10.

$$D(s) = \frac{25 \cdot (2\pi \cdot 25)^2}{s^2 + (2\pi \cdot 25)^2}. \quad (4.12)$$

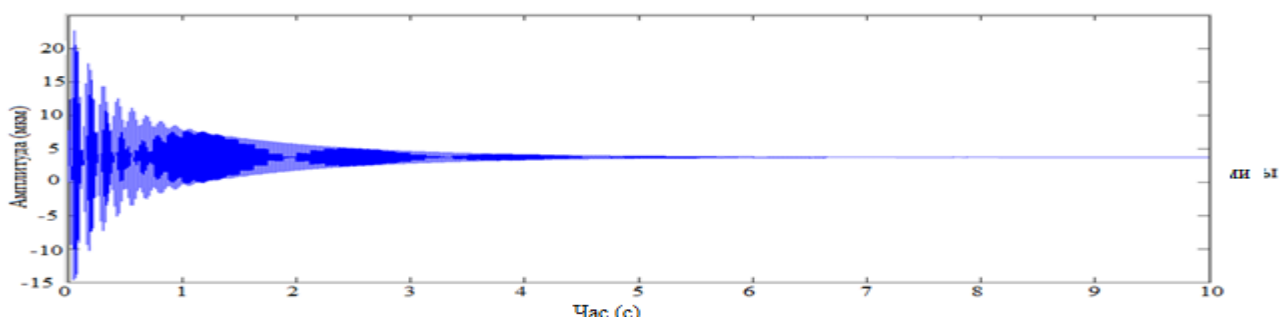
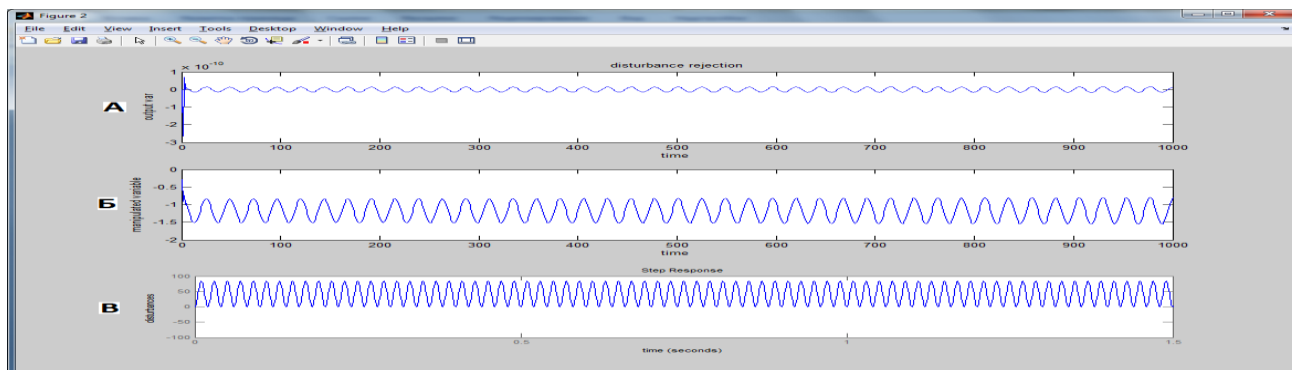


Рис. 4.10. Реакція електродвигуна ШН на одиничну ступінчасту дію

На рис. 4.11 подані результати моделювання для моделі гідротранспорту в цілому з керуванням ПМК-контролером. Вихідне значення зміщення ротора

показане на графіку А. Другий графік (Б) представляє значення керівної змінної. Останній графік (В) показує синусоїдальний сигнал, який подає збуджуючі коливання на резонансній частоті.



А – вихідне значення ВГТС; Б – керівна змінна; В – збуджуючі коливання

Рис. 4.11. Результати моделювання ВГТС, керованою ПМК-контролером

Як видно з вихідного значення зміщення ротора (рис. 4.11, А), система в цілому працює стабільно, не входячи в резонанс. Крім того, амплітуда коливань системи на 20 % менша, ніж при регулюванні ПД-регулятором.

Таким чином, застосування для моделювання системи внутрішньофабричного гідротранспорту багатомасової моделі роторів Джеффкотта-Лавалю є виправданим і актуальним. Крім того, застосування для керування методом контролю по прогностичній моделі керування дає кращі результати, ніж застосування в аналогічній ситуації ПД-регуляторів [145–147].

4.3. Вибір і розробка апаратно-програмних засобів системи підтримки ухвалення рішень для внутрішньофабричного гідротранспорту

Для забезпечення АСУ внутрішньофабричного гідротранспортування, потрібне створення апаратних засобів системи, як нижчого контролерного рівня; так і програмного забезпечення, встановленого в комп'ютерну систему диспетчерської служби, як вищого рівня системи підтримки ухвалення рішень. Як

основа для побудови контролерного рівня була узятa система, описана в роботах [138, 139]. До складу цієї системи увійшли комп'ютер класу Pentium III або вище, та датчики, що забезпечують прийом сигналів від досліджуваного об'єкта.

Як показано в результатах досліджень [131–134, розділи 2–3], у супутніх інформаційних сигналах шламових насосів знаходиться інформація про стан механізмів досліджуваної ВГТС. Таким чином, для отримання інформації про роботу ВГТС необхідно зафіксувати та обробити дані про спожиту насосом електроенергію.

Електродвигуни досліджуваних шламових насосів працюють на змінному струмі частотою 50 Гц. Як показано в роботах [131–135], інформативними частотами ваттmetroграм для насосних агрегатів, що працюють на змінному струмі промислової частоти, є частоти від 0 до 200–250 Гц. Застосувавши теорему Котельникова, частоту дискретизації обираємо рівною 600 Гц.

Оскільки об'єм передаваної інформації порівняно невеликий, то не має сенсу використовувати високошвидкісні інтерфейси сполучення, такі як USB 1.1, USB 2.0 або IEEE1394 Firewire. Для об'ємів інформації близько 2 Кбайт в секунду повною мірою підходить інтерфейс RS232 або RS485, як промисловий стандарт послідовної передачі даних.

Як вищий рівень системи був створений програмний комплекс, що реалізовує наступні функціональні компоненти: відображення сигналу, що приймався з датчиків; фільтрація сигналу фільтром Кальмана; спектральний аналіз прийнятого і відфільтрованого сигналу; відображення як різних статистичних параметрів (дисперсія, асиметрія, математичне сподівання і тому подібне), так і відображення зміни цих параметрів; запис усіх набутих значень для подальшого аналізу та узагальнення отриманих відомостей; можливість порівняння отримуваних даних із вже отриманими даними, прийнятими за еталонних, для визначення подібності та оцінки отримуваного сигналу; запис дій оператора насосів з точним часом здійснення цих дій для подальшого аналізу та побудови експертної системи та нечіткої моделі дій системи керування, що розробляється; система модулів, що підключаються, реалізують методи

розпізнавання на основі математичних та статистичних методів, а також парадигм штучного інтелекту (додатки Д–И).

Формування методики автоматизованого контролю стану гідротранспортної системи ґрунтується на таких положеннях.

Існує загальна модель ВГТС

$$M_0 = \langle P, R \rangle, \quad (4.13)$$

де P – є множиною характеристик, до яких відносяться хімічні і фізичні чинники зовнішнього і внутрішнього середовищ, стану устаткування, прогнозовані події і так далі;

R – множина стосунків між характеристиками з P . Ці характеристики класифікуються та представлені у вигляді об'єднання трьох великих множин

$$P = V \cup B \cup L, \quad (4.14)$$

де V – характеристики зовнішнього середовища;

B – характеристики гідротранспортної системи;

L – характеристики пульпи.

З наданих вимог витікає обов'язкове застосування методів розпізнавання сигналів, що поступають, побудова бази даних або бази знань для зберігання інформації, що поступила, та реакції на неї, а також системи ухвалення рішень, що допомагає операторові в їх виборі.

Для здійснення цього завдання складена блок-схема роботи комплексу (рис. 4.12).

З кожною операцією системи контролю гідротранспорту (СКГ) пов'язана одна або декілька моделей отримання даних, які можуть носити розрахунковий або реєстраційний характер.



Рис. 4.12. Укрупнена блок-схема роботи програмно-апаратного комплексу

Для набуття значень характеристик P_k використовуються такі джерела і канали інформації: приладова реєстрація і аналіз параметрів при проведенні обстежень; приладова реєстрація і аналіз параметрів середовища; дані контролю пульпи.

Проте, узагальнюючи, їх можна звести до двох формальних способів отримання даних: розрахунку з використанням математичних моделей (F); зняття показників з устаткування ГС (G). Устаткування G – це прилади, датчики, генератори, пристосування, в результаті використання яких можуть бути набуті значення характеристик системи гідротранспортування.

Математичні моделі F є сукупністю розрахункових формул і обчислювальних методів для перетворення отримуваних за допомогою апаратури і/або опитування даних до виду, необхідного для здійснення оцінки стану ВГТС.

Опитування полягає в заповненні системою контролю набору анкет (R), обробка яких дозволяє виявити можливі, спочатку не передбачені системою контролю, неполадки і передаварійні ситуації.

Незалежно від своєї приналежності, елементи множини F і G трактуючи як окремий випадок

$$M_j = \langle P^j, R_j \rangle, \quad (4.15)$$

де $P^j \in P, R_j \in R$.

Оцінка стану системи гідротранспорту є множиною $Qn=\{Qnm\}$ технологічних висновків, які можуть бути зроблені на основі результатів виконання програми обстеження $Пн$. Приклад таких висновків наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Висновки експертної системи

Висновки $\{Q\}$
1. Зниження жорсткості кріплення агрегату
2. Присутні ознаки засмічення трубопроводу
3. Прогин валу. Достовірність 70 %
4. Порушення балансу робочого колеса. Достовірність 85 %
5. Знос елементів проточної частини

Початковими даними для формування висновків окрім значень характеристик множини характеристик P також є заснована на теоретичній моделі база цих станів ГС і оцінки достовірності відхилень технологічних показників в різних аналізах. Структурно інформація в базі даних розділена на три групи: теоретично обчислені параметри гідротранспортної системи, зауваження та обмеження, що введені експертами, а також параметри, отримані в процесі знімання реальних даних. Для усіх характеристик в базі даних присутні оцінки достовірності цих показників, які в процесі роботи можуть змінювати свою вагу.

Достовірними вважаються ті дані, сукупна оцінка достовірності яких відповідає встановленому рівню. Достовірні значення характеристик, взяті з бази даних та отримані в результаті виконання програм обстеження, поступають в базу знань та використовуються, по-перше, для формування/корекції множини E правил висновку, а, по-друге, безпосередньо для отримання самих цих висновків Q . Структура цих даних подано на рис. 4.13.

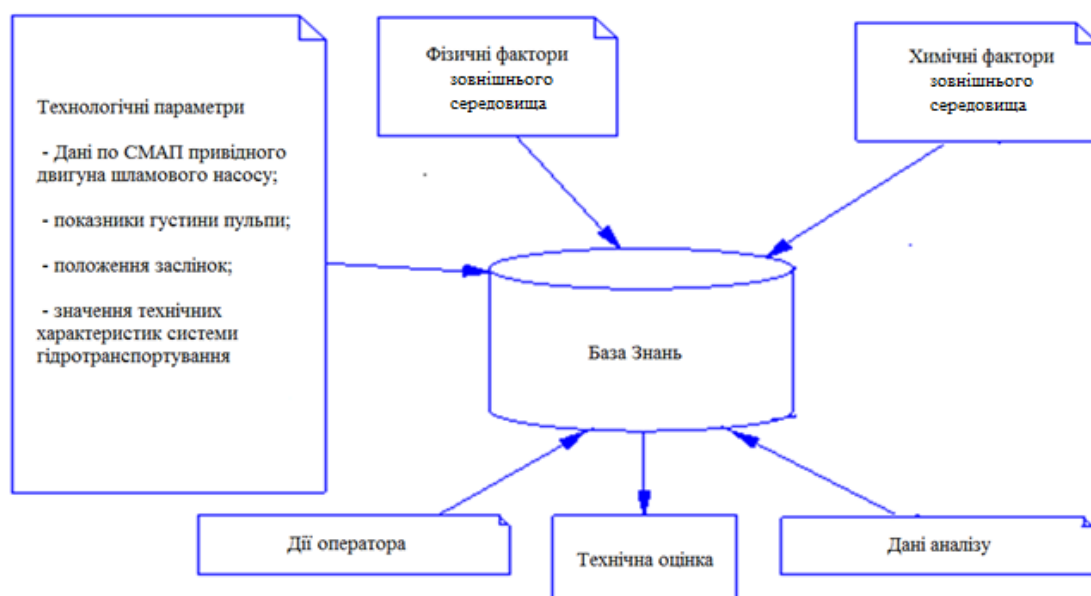


Рис. 4.13. Структура даних для формування бази знань комплексної оцінки стану об'єкту

Формування правил бази знань здійснювалося на основі опитувальних анкет експертів, а також – розроблених раніше схем залежності «Елемент-Несправність/Відмова-Ознака».

Приклади правил з розробленої бази знань:

- ЯКЩО (частоти спектра СМАП, що відносяться до підшипників, мають тенденцію до збільшення) І (амплітуда частот СМАП, що відображає вібрації вала перевищує норму на 10 %), ТО з імовірністю 80 % можливою причиною цього є деформація передавального валу. Рекомендована зупинка для ремонту;

- ЯКЩО (напір менше норми) І (СМАП відображає підвищену вібрацію агрегату) І (перегрів підшипників), ТО з імовірністю 85 % можлива відмова

підшипників. Рекомендовано змащування підшипників.

Для повноцінного функціонування системи, що розробляється, в її базі даних знаходиться кількість прикладів, яка б містила від 70 % до 90 % можливих станів сигналів, їх описи, а також пропоновані варіанти рішень диспетчера за цим сигналом, які система оперативно може запропонувати як керівні дії технологічному процесу. Ці дані були отримані як емпіричним шляхом – записи сигналів безпосередньо технологічного процесу і запису дій диспетчерської служби на ці сигнали, так і шляхом моделювання – запис сигналів математичної моделі процесу з передбачуваними діями диспетчера. Обидва шляхи недостатньо досконалі: емпіричний – унаслідок важковідтворюваності усіх можливих варіантів сигналів, особливо аварійних, а моделювання зв'язане з можливим неповним обліком різних параметрів моделі і, як наслідок, недостатньою точністю. Тому для заповнення бази цих прикладів сигналів слід використовувати обидва методи, а також додатковий запис прикладів сигналу безпосередньо в процесі функціонування системи підтримки ухвалення рішень.

У результаті аналізу, проведеного в роботах [148, 149] для побудови системи ідентифікації технічного стану були відібрані такі методи, як: експертна система, метод кластеризації, нейронні мережі Хопфілда та зворотного поширення помилки, метод потенційних функцій, метод Левенштейна, метод розпізнавання методом порівняння з еталоном і метод k найближчих сусідів, які дають найбільшу швидкодію в режимі оцінки технічного стану об'єкта.

4.4. Розробка блоку ідентифікації технічного стану системи гідротранспорту гірничо-збагачувального підприємства

Завдання діагностики, на відміну від завдань моніторингу, складніші, тому що передбачають не лише контроль стану об'єкта в цілому, але і контроль стану окремих вузлів і механізмів досліджуваного об'єкта, а також прогнозування стану технологічного процесу в цілому, об'єкта і його вузлів. Підсумовуючи, необхідно відзначити, що для аналізу функціонального стану контрольованого об'єкта є

перспективним використання, як статистичних методів обробки сигналів, так і методів, які використовують парадигми штучного інтелекту [142, 144]. Перспективним є підхід, при якому для аналізу сигналів, що поступають, будуть паралельно задіяні як статистичні методи, так і методи штучного інтелекту.

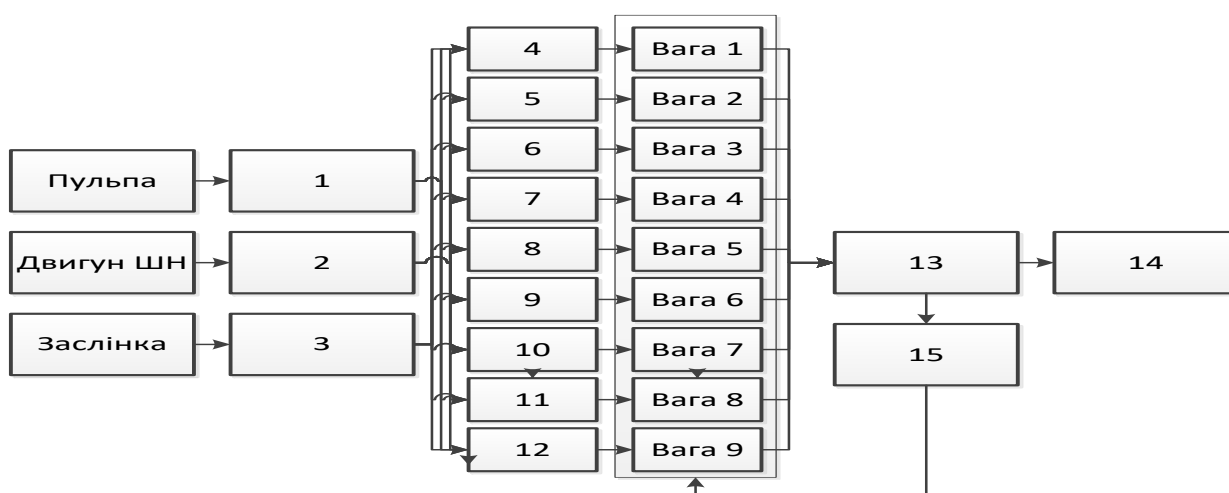
Таким чином, для вирішення цього завдання, розроблений програмно-апаратний комплекс, що об'єднує у своєму складі усі описані вище методи [148–150]. У процесі розробки було проведено аналіз методів діагностики, стосовно аналізу сигналів СМАП приводного електродвигуна шламового насоса, отриманих в результаті моделювання (розділ 2) та експериментальних досліджень (розділ 3). Як критерії відбору методів були визначені вимоги «Точність розпізнавання поточного стану не менше 70 %» і «Час розпізнавання на промисловому комп'ютері не більше 1 с». Для здійснення цього завдання складена блок-схема роботи аналізатора комплексу [151], а за результатами обчислювальних експериментів були виділені методи, вказані на рис. 4.14.

Ця блок-схема відрізняється від раніше запропонованих схем аналізу наявністю паралельної роботи методів розпізнавання. Розроблена система функціонує на основі методів розпізнавання та методів штучного інтелекту, заснованих на використанні прикладів, для побудови висновків і рекомендацій до дій людини-диспетчера. Схема такої системи наведена на рис. 4.14.

Якщо є множина керівних рішень P_y та є n методів розпізнавання, кожен з яких пропонує рішення $P_{yij} \in P_y$, то спільне рішення нейроподібної структури (НС) буде визначено як

$$P'_y = \max \left(\sum_{i=1}^n k_i \right) P_{yij}, \quad (4.16)$$

де k_i — коефіцієнт довіри методу i , налаштованого в процесі навчання нейроподібної структури. Нейроподібною структурою приймається рішення, яке набрало найбільше сумарне значення довіри із запропонованих методами варіантів рішення.



1 – щільність пульпи; 2 – спектральні характеристики СМАП; 3 – датчик відкриття; 4 – експертна система; 5 – нейронна мережа Хопфілда; 6 – багат шаровий 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. 4.14. Схема системи підтримки ухвалення рішень з нейроподібною структурою

Для забезпечення роботи системи будується база знань, в яку вноситься ряд прикладів – зразків спектру СМАП гідротранспортної системи, варіанти дій диспетчера, як реакції на ситуацію, описану сигналами, і оцінка достовірності цих дій [151].

Для цього на початковому етапі на зразковій математичній моделі гідротранспортної системи до бази знань вносяться зразки сигналів, отримані шляхом моделювання, та передбачувані еталонні дії диспетчера, як реакції на ці зразки сигналів, при цьому кожен сигнал відноситься до одного з класів: «Нормальна робота», «Передаварійний режим», «Аварія», а також прогнозована дія диспетчера у відповідь на цей сигнал: у відповідь на сигнал про аварію в проводці ШН потрібне відключення цього ШН. Крім того, кожному з методів привласнюється власна вага, що відображає достовірність виводів цього методу.

В процесі роботи ваги методів змінюються залежно від достовірності їх виводів, а саме: вага методу, який дав правильний прогноз, збільшується, а вага методу, який дав невірний прогноз, зменшується. Таким чином, чим більш правильні відповіді будуть у цього методу, тим вище буде його вага в ухваленні консолідованого рішення системи.

На наступному етапі – етапі навчання, система підтримки ухвалення рішень працює в режимі «учня»: порівнює реальні сигнали гідротранспортної системи із змодельованими сигналами і, у разі достатньої подібності, модифікує сигнал, або ж вносить до бази знань новий зразок. При цьому підсистема контролю відстежує дії диспетчера та їх правильність, тобто записавши дію диспетчера в базу, програма через певні проміжки часу, що задаються оператором, контролює стан гідротранспортної системи, і, якщо сигнали відповідають «нормальній роботі», програма приймає рішення оцінити зроблену дію, як правильне рішення.

На етапі внесення до бази знань даних, отриманих на моделі, були створені та внесені до бази знань максимальна кількість можливих станів гідротранспортної мережі та сигнали, відповідні цим станам. При цьому, при коригуванні бази знань в режимі «учня», не завжди є можливим записати усі аварійні або передаварійні сигнали з причин, що пред'являються технікою безпеки. Тому, при накопиченні потрібного, на думку експерта-учителя, але необов'язково абсолютно повного об'єму реальної інформації про можливі стани і дії у відповідь диспетчера, розроблену систему рекомендується перевести в основний режим роботи – режим розпізнавання та підтримки ухвалення рішень диспетчерської служби.

Функціонально на першій ланці нейроподібної структури 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

$$k_{lv} = \min(D(S_1, S_2)) = \min(\min(D(i, j-1)+1, D(i-1, j)+1, D(i-1, j-1)+m(S_1[i], S_2[j]))) \quad (4.17)$$

Свою чергою, мережа Хопфілда оптимізована під розпізнавання піксельного подання спектрів у вигляді вхідного вектору, 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 вектору X з еталонними, та приймається відповідне керуюче рішення методу з числа тих, які визначені в додатку Б дисертації.

Для метода потенційних функцій (щодо спектру СМАП)

$$a(u) = \arg \max_{y \in Y} \sum_{i=1}^m [x_{i,u} = y] w(i, u), \quad w(i, u) = y(x_u^{(i)}) K \left(\frac{\rho(u, x_u(i))}{h(x_u(i))} \right), \quad (4.18)$$

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

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

У режимі основної роботи – підтримка ухвалення рішень, яка полягає в аналізі сигналів та видачі рекомендацій диспетчерові, над сигналом спочатку проводиться статистичний та спектральний аналізи; потім кожен з методів

аналізує отриманий сигнал і результати попередніх аналізів, порівнює їх з аналогічними результатами еталонних сигналів, і генерує відповідь, відносячи отриманий сигнал до одного з класів сигналів. Після цього усі результати методів аналізу множаться на «вагомість» цього методу, і результати підсумовуються для отримання підсумкової відповіді. За результатами сумарного рішення методів розпізнавання сигналів диспетчерові пропонується зробити ту або іншу керувальну дію, або рішення. Блок-схема роботи усього комплексу подано на рис. 4.15.

У роботі [151] була запропонована модель основного елемента системи підтримки ухвалення керуючих рішень – нейроподібної структури, яка припускає вибір одного рішення з множини запропонованих, проте, для оцінки адекватності вибору необхідно провести ряд досліджень діагностування системи гідротранспорту.

У загальному випадку завдання ухвалення рішення полягає у виборі серед множині недомінуючих альтернатив такої підмножини (найчастіше – єдиного рішення або множині еквівалентних), яка, виходячи з умови завдання, задовольняла б встановленим критеріям ухвалення рішень [152]. Найбільш простим випадком є вибір з декількох варіантів одного, при якому заданий тільки один критерій якості, що дозволяє порівнювати два об'єкти і точно вказати, який з них буде кращим. Якщо функція мети відома заздалегідь, то легко вибрати той варіант керуючого рішення, для якого цей критерій набуває екстремального значення. Для введення варіантів рішень пропонується система, основана на підході, що запропоновано в роботі [153].

Для аналізу спектральних характеристик СМАП приводного електродвигуна шламового насоса в роботах [133, 134] за такий критерій береться максимальна подібність спектра, отриманого з електродвигуна шламового насоса, та спектра, що є еталонним для того або іншого режиму його роботи. Міра подібності і критерій оцінки описуються формулами (2.8) і (2.9).

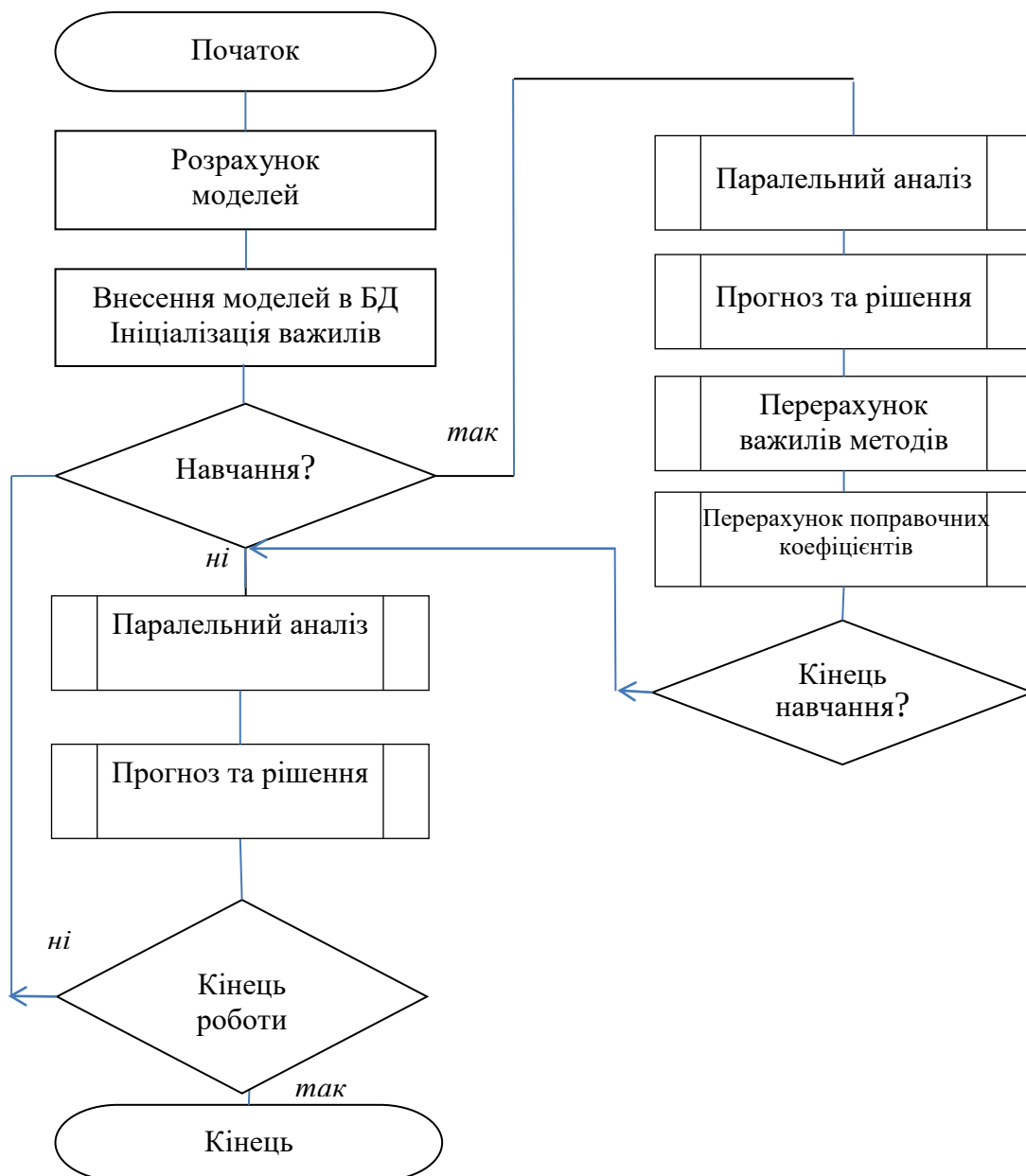


Рис. 4.15. Укрупнена блок-схема роботи комплексу NGU-Hydra

Нейроподібна структура [151] також приймає рішення про ідентифікацію тієї або іншої ситуації як однієї із заздалегідь відомої (еталонної). Якщо є множина рішень P_y і n методів розпізнавання, що управляють, кожен з яких пропонує рішення $P_{yj}P_y$, то сукупне рішення нейроподібної структури буде визначено як

$$P_y^* = \max \left(\sum_{j=1}^n k_j P_{yj} \right), \quad (4.19)$$

де k_j – поточна вага j -го методу (визначається в ході навчання як міра «авторитетності» того або іншого методу як міра точності запропонованих рішень);

P_{yj} – рішення, запропоноване j -м методом ухвалення рішень.

Таким чином, нейроподібною структурою приймається рішення, яке набрало найбільше сумарне значення довіри із запропонованих методами варіантів рішення.

Одним з актуальних науково-практичних завдань є навчання нейроподібною системи, що приймає рішення. Спочатку нейроподібна структура розглядає рішення, прийняті від усіх систем, рівнозначними, тобто коефіцієнт довіри рішення, що приймається $k_j = 1/9$, $\forall j = \overline{1,9}$. Після цього починається самонавчання, для зміни важилів різних методів пропонується наступна формула [152]

$$k_j = (1 - \mu)k_j + \mu \cdot N_j^{TRUE} / N, \quad (4.20)$$

де N^{true} – кількість вірна ідентифікованих j -м методом ситуацій;

N – загальна кількість пред'явлених нейроподібній структурі ситуацій;

N_j^{TRUE} / N – коефіцієнт ідентифікації стану для j -го методу;

μ – параметр швидкості навчання, $\mu \in [0, 1..0,25]$.

Логічно, що в процесі навчання $\sum k_j$ може істотно відрізнятись від 1: на початковому етапі – в меншу сторону, після декількох десятків або сотень прикладів – у більшу. Це пояснюється тим, що декілька методів одночасно можуть давати як правильну, так і неправильну відповідь. Величини k_j (4.20) мають бути нормовані за модулем 1.

Аналіз формули (4.20) показує, що на початковому етапі кожен приклад може істотно впливати на міру довіри до того або іншого методу. Із зростанням же N цей вплив поступово нівелюється, а сам коефіцієнт довіри асимптотично наближається до точності ідентифікації самого методу. Перевірка запропонованих критеріїв оцінки стану гідротранспортної системи та ухвалення рішень в ній була

вироблена в ході математичних і натурних експериментів. 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

$$k_l = 1 - \frac{\sum (y_\tau - y_{\tau-1})}{\tau}, \quad (4.21)$$

де y_τ – поточний стан ГТС, $y_{\tau-t}$ – стан, що був передбачений t часу тому, τ – загальна кількість рішень методу. Результати якості розпізнавання приведені в табл. 4.2 (рис. 4.16, рис. 4.19). Нейроподібна структура показує схожі з іншими методами результати ідентифікації режимів, іноді поступаючись багатоваріантовому перцептрону.

Таблиця 4.2

Коефіцієнт ухвалення правильних рішень за станом ГТС різними методами без урахування зносу устаткування – моделювання

№	Метод розпізнавання	Нормальний режим роботи	Передаварійна ситуація	Аварійна ситуація
1	Мережа Хопфилда	0,836	0,925	0,902
2	Багатоваріантовий перцептрон	0,971	0,954	0,976
3	Експертна система	0,965	0,932	0,926
4	Метод кластеризації	0,845	0,761	0,903
5	Метод потенційних функцій	0,881	0,894	0,922
6	Метод Левенштейна	0,856	0,828	0,876
7	Метод k найближчих сусідів	0,951	0,931	0,944
8	Нейроподібна структура	0,967	0,982	0,987

На другому етапі досліджень проведено імітаційне моделювання різних станів ВГТС з урахуванням зносу конструктивних елементів, які також були пред'явлені різним методам для розпізнавання. Результати точності розпізнавання приведені в табл. 4.3 (рис. 4.17, рис. 4.20). Порівняння результатів табл. 4.2 і 4.3, показує, що вплив величини зносу істотно знижує якість ідентифікації режимів більшості використаних методів і практично не позначається на результатах

роботи нейроподібної структури. На третьому етапі проведено дослідження різних станів ВГТС, результати якого також були пред'явлені різним методам для розпізнавання. Результати якості розпізнавання режимів роботи ВГТС приведені в табл. 4.4 (рис. 4.18, рис. 4.21).

Таблиця 4.3

Коефіцієнт ухвалення правильних рішень за станом ГТС різними методами з урахуванням зносу устаткування – моделювання

№	Метод розпізнавання	Нормальний режим роботи	Передаварійна ситуація	Аварійна ситуація
1	Мережа Хопфилда	0,819	0,914	0,912
2	Багатошаровий персептрон	0,941	0,934	0,986
3	Експертна система	0,931	0,923	0,930
4	Метод кластеризації	0,845	0,761	0,903
5	Метод потенційних функцій	0,874	0,886	0,913
6	Метод Левенштейна	0,841	0,836	0,879
7	Метод k найближчих сусідів	0,937	0,927	0,937
8	Нейроподібна структура	0,972	0,980	0,989

Як випливає з наведених таблиць та графіків, нейроподібна структура, вживана для узагальнення результатів, отриманих різними методами, дає більшу точність в порівнянні з кожним з методів, що беруть участь у виведенні остаточного рішення.

Таблиця 4.4

Коефіцієнт ухвалення правильних рішень за станом ГТС різними методами з урахуванням зносу устаткування на експериментальних даних

№	Метод розпізнавання	Нормальний режим	Передаварійна ситуація	Аварійна ситуація
1	Мережа Хопфилда	0,815	0,918	0,916
2	Багатошаровий персептрон	0,943	0,931	0,982
3	Експертна система	0,933	0,929	0,930
4	Метод кластеризації	0,843	0,766	0,903
5	Метод потенційних функцій	0,871	0,882	0,913
6	Метод Левенштейна	0,836	0,838	0,879
7	Метод k найближчих сусідів	0,932	0,923	0,937
8	Нейроподібна структура	0,974	0,984	0,989



Рис. 4.16. Ненормований коефіцієнт ухвалення правильних рішень за станом ВГТС різними методами без урахування зносу устаткування



Рис. 4.17. Ненормований коефіцієнт ухвалення правильних рішень за станом ГТС різними методами з урахуванням зносу устаткування



Рис. 4.18. Ненормований коефіцієнт ухвалення правильних рішень за станом ГТС різними методами з урахуванням зносу устаткування на реальних даних



Рис. 4.19. Нормований коефіцієнт ухвалення правильних рішень за станом ВГТС різними методами без урахування зносу устаткування



Рис. 4.20. Нормований коефіцієнт ухвалення правильних рішень за станом ГТС різними методами з урахуванням зносу устаткування

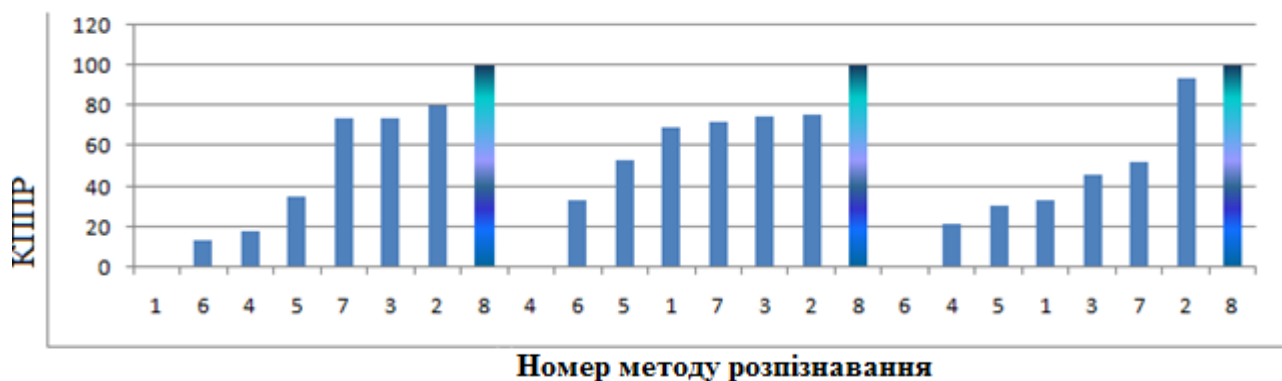


Рис. 4.21. Нормований коефіцієнт ухвалення правильних рішень за станом ГТС різними методами з урахуванням зносу устаткування на експериментальних даних

За результатами проведених тестів виконана перевірка статистичної гіпотези про достовірність роботи програмного комплексу на основі нейроподібної структури. У табл. 4.5 приведені значення реакції програмного комплексу NGU-Hydra, вибору керуючих рішень, що реалізовує критерії, на основі ідентифікації виникаючих ситуацій згідно з виразами (2.8)–(2.9) і (4.17)–(4.18) для різних станів гідротранспортної системи. У таблиці відображені результати моделювання 2000 випадків, одна половина з яких описувала нормальний стан ГТС, інша – аварійний.

Таблиця 4.5

Показник точності роботи програми NGU-Hydra при ідентифікації стану системи – моделювання

Стан, що діагностується програмою NGU-Hydra	Реальний стан гідротранспортної системи	
	Нормальне	Аварійне
Нормальне	972	12
Аварійне	28	988

Як випливає з табл. 4.5, система на основі нейроподібної структури дає помилки як першого, так і другого роду, але їх кількість не перевищує 3 %. Проте, для усунення помилок другого роду, а саме пропусків аварійних ситуацій, здатних спричинити вихід устаткування з ладу та наступні значні матеріальні втрати, було проведено додатковий цикл навчання, що включає підвищену кількість аварійних ситуацій.

Результати роботи програмного комплексу після додаткового навчання на тій же початковій вибірці прикладів, що і при початковому моделюванні, приведені в табл. 4.6.

Як видно з табл. 4.5 і 4.6, навчена в штатному режимі нейроподібна структура визначає стан контрольованої системи з точністю 98 %, проте кількість помилок другого роду при цьому складає 1,2 %, а помилок першого роду – 2,8 %.

Таблиця 4.6

Показник точності роботи програми NGU-Hydra при ідентифікації стану системи після донавчання

Стан, що діагностується програмою NGU-Hydra	Реальний стан гідротранспортної системи	
	Нормальне	Аварійне
Нормальне	964	6
Аварійне	36	994

Слід врахувати, що помилково ідентифікований аварійний стан легко перевірити візуальним контролем оператора, що знаходиться на об'єкті. В той же час пропуск аварійної ситуації – помилка несумірно істотніша. Додатково нейроподібна структура визначає стан контрольованої системи внутрішньофабричного гідротранспорту практично з тією ж середньою точністю – 97,9 %. Проте кількість помилок другого роду при цьому знижується до 0,6 % – удвічі від первинного навчання.

Перший з вибраних критеріїв використовує міру схожості спектра споживаної активної потужності приводним електродвигуном шламового насоса і еталонного спектру для різних станів. Схожість в нормованому евклідовому просторі оцінюється за квадратичною відстанню. Другий критерій використовує принцип авторитетного голосування для вибору з кінцевої множини станів, що оцінюються декількома методами. У роботі запропонована нейроподібна структура, яка змінює авторитет кожного з методів оцінки залежно від статистичної якості запрогнозованих рішень.

У ході експериментальної перевірки запропонованих критеріїв на модельних і експериментальних даних, отриманих від реального об'єкту, були отримані високі оцінки якості розпізнавання поточного стану ВГТС, що характеризуються більшою точністю порівняно із стандартними методами, що застосовувалися раніше. Особливо показові результати застосування системи із запропонованими критеріями ухвалення рішень для розпізнавання стану ВГТС, що знаходиться в зношеному стані: точність розпізнавання стає вище, ніж у

раніше відомих методів. Об'єднання декількох систем контролю одиничних систем гідротранспортування можна виконати за портальним принципом.

Визначення порталу, як джерела для кінцевого користувача агрегованої та класифікованої інформації, накладає на нього архітектурні обмеження, виражені у вигляді списку вимог, що пред'являються до порталів:

- агрегація інформації з розрізнених джерел;
- класифікація зібраної інформації та зберігання її у вигляді, який надає найбільші можливості для доступу до інформації, що цікавить з максимально великою швидкістю та мінімально можливими затратами на її пошук;
- видача користувачеві інформації, що цікавить його, в зручному для нього форматі.

Для досягнення поставленої мети програми кошти порталу повинні поєднувати в собі як засоби збору інформації (скрипти збору, програми-аналізатори, засоби взаємодії з системами зберігання інформації), так і засоби зберігання та аналізу зібраної інформації – СУБД і засоби роботи з ними для кращого аналізу та структурування.

Для видачі інформації користувачеві, пропонується використання мов веб-програмування поряд із засобами стандартної розмітки інформації, тобто поєднання динамічної складової веб-порталу та статичної інформації, що не залежить від часу та запитів користувача.

Застосування нейроподібної структури для розпізнавання поточного стану системи гідротранспорту та прогнозування розвитку ситуації, є виправданим підходом. Впровадження запропонованих методів у рекомендаціях з ефективного використання способів термічної переробки відходів вуглезбагачення і некондиційного вугілля енерготехнологічним комплексом приносить плановий розрахунковий економічний ефект від експлуатації, рівний 7553,82 тис. грн/рік (додаток Л).

Висновки до розділу 4

В результаті досліджень, проведених в розділі 4, зробимо наступні висновки:

1. Уперше для діагностики процесу гідротранспортування запропонований теоретико-множинний підхід, що включає нормальні, передаварійні та аварійні режими роботи ВГТС та розроблена ситуаційна модель ухвалення керівних рішень, в умовах інформаційної невизначеності, що полегшує контроль системи гідротранспортування в умовах часткової втрати інформаційних сигналів.

2. Запропонований метод контролю та діагностики системи внутрішньофабричного гідротранспорту, заснований на запропонованій в роботі нейроподібної структури, такої, що відрізняється від раніше існуючих моделей можливістю адаптації до змін умов експлуатації внутрішньофабричних гідротранспортних систем.

3. Уперше застосована самонавчальна структура для контролю і діагностики станів процесу внутрішньофабричного гідротранспортування, що дає приріст коефіцієнта ухвалення правильних рішень відносно до раніше запропонованих методів.

4. Методика розробки системи підтримки ухвалення рішень для керування технологіями гідротранспорту на гірничих підприємствах впроваджена в дослідницькі програми Інституту геотехнічної механіки НАН України ім. Полякова (додаток И).

Впровадження запропонованих методів у рекомендаціях з ефективного використання способів термічної переробки відходів вуглезбагачення та некондиційного вугілля енерготехнологічним комплексом приносить плановий розрахунковий економічний ефект від експлуатації, рівний 7553,82 тис. грн/рік (додаток Л).

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 багатокритерійної 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 уможлиблює 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Руководство по решениям в автоматизации. Практические аспекты систем управления технологическими процессами. SchneiderElectric S.A. МКР-CAT-AUGUIDE-11 04/2011. – Париж. – 323 с.
2. Бабанин А.В. Разработка методов и средств создания и модернизации автоматизированных систем управления и обработки информации (на примере машиностроительного производства) : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)» / А.В. Бабанин. – М., 2009. – 25 с.
3. Отчет о научной и научно-организационной деятельности Учреждения Российской академии наук Института горного дела Уральского отделения РАН за 2008 г. – Екатеринбург. – 2008. – 108 с.
4. Біліченко М.Я. Транспорт на гірничих підприємствах. Підручник для ВУЗів / М.Я. Біліченко. – Дніпропетровськ: НГУ, 2005. – 636 с.
5. Смолдырев А.Е. Гидро- и пневмотранспорт в металлургии / А.Е. Смолдырев. – М.: Металлургия, 1985. – 383 с.
6. Дмитриев Г.П. Гидротранспорт руд и концентратов / Г.П. Дмитриев, А.Е. Смолдырев. – М.: Цветметинформация, 1966. – 345 с.
7. Насоси. Класифікація. Терміни та визначення : ДСТУ 3063-95. – [Чинний від 1996-01-07]. – К.: Держстандарт України, 1995. – 75 с. – (Гр. 01.040.23).
8. Центробежные грунтовые и фекальные насосы. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1971. – 67 с.
9. Economical Aspects of Variable Frequency Drives. Scientific Impeller No. 1998 Energy Comparison VFD vs. ON-OFF. The British Pump Market 1981. – 82.
10. Кулінченко В.Р. Гідравліка, гідравлічні машини та гідропривід / В.Р. Кулінченко. – К.: Инкос, 2006. – 616 с.
11. Филимонов О.В. Разработка методов и технических средств контроля соосности валов по результатам вибродиагностики насосных агрегатов : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.02.13 «Машины,

агрегаты и процессы (нефтегазовая отрасль)» / О.В. Филимонов. – Уфа, 2002. – 24 с.

12. Иванов В.А. Диагностика технического состояния оборудования насосных и компрессорных станций / В.А. Иванов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. – 104 с.

13. Константинов Ю.М. Технічна механіка рідини і газу. [Підручник] / Ю.М. Константинов, О.О. Гіжа. – К.: Вища школа, 2002. – 277 с.

14. Нафиков А.Ф. Выявление дефектов подшипников качения с использованием метода фазовых портретов при вибродиагностике насосных агрегатов : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (машиностроение и нефтеперерабатывающая промышленность)» / А.Ф. Нафиков. – Уфа: УГНТУ, 2004. – 23 с.

15. Перовищиков С.И. Разработка научных основ управления вибрацией гидродинамического происхождения в центробежных насосах магистральных нефтепроводов : автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук : спец. 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (нефтяной и газовой отрасли)» / С.И. Перовищиков. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2004. – 48 с.

16. Каминский С.Г. Разработка методов вибродиагностирования и восстановления электроприводных нефтепромысловых насосных агрегатов : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая отрасль)» / С.Г. Каминский. – Уфа: УГНТУ, 2004. – 24 с.

17. Информационный сборник насосного оборудования / [сост. Р.М. Холопова [и др.]. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1991. – 144 с.

18. Лопастные и роторные насосы: каталог. – М.: ЦИНТИХИМ-НЕФТЕМАШ, 1990. – 68 с.

19. Крупные диагональные и центробежные вертикальные насосы: каталог. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1990. – 28 с.

20. Центробежные насосы для абразивных гидросмесей: каталог. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1989. – 25 с.
21. Flowserve Pumps. Milan.: Flowserve Corporation Italy, 2001. – 38 p.
22. ВИНТОВЫЕ НАСОСЫ ОБЪЕМНОГО ДЕЙСТВИЯ. – М.: CSFinox, 2005. – 25 с.
23. Новое семейство шламовых насосов Metso. – СПб.: MetsoMinerals, 2001. – 17 с.
24. Насосы Nocchi: паспорт и руководство по эксплуатации. – М.: Ноччи, 2002. – 24 с.
25. Насосы и оборудование фирмы Smedegaard. – М.: Smedegaard, 2006. – 46 с.
26. Насос KM 50-32-200. – Чайковский: ОАО НПП «Адонис», 2007. – 16 с.
27. THE SEWAGE PUMPING HANDBOOK. – Berlin: Grundfos, 2008. – 116 p.
28. Pump handbook. Berlin: Grundfos, 2007. – 152 p.
29. Поляков В.В. Насосы и вентиляторы: Учебник для вузов / В.В. Поляков, Л.С. Скворцов. – М.: Стройиздат, 1990. – 336 с.
30. Дмитриев Г.П. Напорные гидротранспортные системы / Г.П. Дмитриев, Л.И. Махарадзе, Т.Ш. Гочиташвили. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
31. Пособие по проектированию гидравлического транспорта (к СНиП 2.05.07-85). – М.: Стройиздат, 1988. – 40 с.
32. Руководство по проектированию систем гидротранспорта продуктов обогащения цветной металлургии. – Л.: Механобр, 1983. – 150 с.
33. Методы и технические средства контроля соосности валов / В.И. Логвиненко, Б.А. Грядущий, Н.А. Чехлатый, В.И. Мялковский // Уголь Украины. – 2005. – №9. – С. 32–35.
34. Руссов В.А. Спектральная вибродиагностика / В.А. Руссов. – Пермь, 1996. – 176 с.
35. Зубенко Д.Ю. Техническая диагностика подшипников качения подвижного состава городского электротранспорта / Д.Ю. Зубенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №4–7. – С. 6–9.

36. Лянзберг В.П. Балансировка. Центровка валов. Диагностика подшипников качения. Диагностика электродвигателей / В.П. Лянзберг, В.И. Харченко, В.Г. Атаманюк // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. – 2006. – №1. – С. 34–36.

37. Wachel J.C. Displacement method for determining acceptable piping vibration amplitude / PVP-Vol. 313-2/ International pressure vessels and piping codes and standards. Volume 2 – Current perspectives. ASME, 1995. – 197–207 pp.

38. Бенькович Е.С. Практическое моделирование динамических систем / Е.С. Бенькович, Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.

39. Глухова Н.В. Интеллектуальные модели системы поддержки принятия решений при автоматизированном управлении процессом гидротранспортирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 / Глухова Наталья Викторовна. – Днепропетровск, 2002. – 156 с.

40. Зікратий С.В. Розробка методу діагностування заглиблених електроустановок для видобутку нафти : автореф. дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук : спец. 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» / С.В. Зікратий. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2002. – 22 с.

41. Hrbček J. Active control of rotor vibration by model predictive control. – A simulation study / Hrbček J. – Helsinki: Helsinki university of control, 2007. – 34 pp. ISBN 978-951-22-8824-3, ISSN 0356-0872.

42. Бреннер В.А. Динамика проходческих комбайнов / В.А. Бреннер. – М.: Машиностроение, 1977. – 224 с.

43. Садовой А.В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / А.В. Садовой, Б.В. Сухинин, Ю.В. Сохина. – К.: ИКСМО, 1996. – 298 с.

44. Грачев В.В. Динамика трубопроводных систем / В.В. Грачев, С.Г. Щербаков, Е.И. Яковлев. – М.: Наука, 1987. – 438 с.

45. Баранов Ю.Д. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, В.Д. Семененко [и др.]. – Днепропетровск: Новая идеология, 2006. – 416 с.

46. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения / Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко, Е.В. Семененко. – Севастополь: Вебер, 2002. – 247 с.

47. Кириченко Е.А. Определение проектных параметров гидротранспортной установки на базе экономико-математической модели / Е.А. Кириченко, И.М. Чеберячко, В.Г. Шворак, В.В. Евтеев // Геотехническая механика : межвед. сб. научн. трудов. – Днепропетровск. – 2005. – Вып. 62. – С. 238–246.

48. Закладний О.М. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навч. посібник / О.М. Закладний, А.В. Праховник, О.І. Соловей. – К.: Кондор, 2005. – 408 с.

49. Насосы. Термины и определения: ГОСТ 17398-72. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 35 с.

50. Методика расчета гидротранспортных установок для транспорта и намыва хвостов железорудных ГОКов. – К.: НИИСП Госстроя УССР, 1970. – 64 с.

51. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах / И.А. Чарный. – М.: Недра, 1975. – 296 с.

52. Спиваковский А.О. Автоматизация трубопроводного транспорта в горной промышленности / А.О. Спиваковский, А.Е. Смолдырев, Ю.С. Зубакин. – М.: Недра, 1972. – 344 с.

53. Аракелян А.К. Способы построения систем автоматического управления электроприводами насосов, работающих на длинные трубопроводы / А.К. Аракелян, А.В. Шепелин // Электротехника. – 2001. – №2. – С. 35–40.

54. Enayet B. Halim, Sirish L. Shah, M. A. Shoukat Choudhury, Ramesh Kadali. Application of Bicoherence Analysis on Vibration Data for Condition Based Monitoring of Rotating Machinery. Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control. Seoul, Korea, July 6-11, 2008.

55. Семененко Е. В. Нестационарные задачи фильтрации и дезинтеграции в процессах гидротранспорта сыпучих материалов: дис. ... канд. техн. наук : 05.15.11 / Е.В. Семененко. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 1998. – 204 с.

56. Семененко Є.В. Розвиток наукових основ гідромеханізації для відкритої розробки розсипних родовищ : автореф. дис. на здобуття наукового ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.15.09 «Геотехнічна і гірнича механіка» / Є.В. Семененко. – Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2009. – 40 с.

57. Писаревский В.М. Использование вибродиагностики для повышения надежности эксплуатации центробежных насосов / В.М. Писаревский. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1988. – 50 с. – (Обзор/ Сер. Эксплуатация, модернизация и ремонт оборудования; Вып. 3).

58. Купін А.І. Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології / А.І. Купін. – Кривий Ріг: Видавництво КТУ, 2008. – 204 с.

59. Мещеряков Л.І. Методи і моделі ідентифікації та управління гірничими технологічними комплексами: Монографія / Л.І. Мещеряков. – Дніпропетровськ: НГУ, 2009. – 263 с.

60. Ровінський В.А. Вдосконалення ватметрографічних методів діагностування штангових глибинно-насосних установок для видобутку нафти та розробка технічних засобів для їх реалізації : автореф. дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук : спец. 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» / В.А. Ровінський. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2003. – 19 с.

61. Дудля М.А. Діагностування та проектування бурових машин і механізмів / М.А. Дудля, Л.І. Мещеряков. – Дніпропетровськ: НГУ, 2004. – 448 с.

62. Кочура Е.В. Развитие научных основ автоматизации процессов магнитного обогащения руд с целью энергосбережения: дис. ... доктора техн. наук : 05.13.07 / Е.В. Кочура. – Дніпропетровськ: НГУ, 1996. – 372 с

63. Бандура В.В. Розробка методу вібраційного контролю технічного стану штангових глибино-насосних установок для видобутку нафти : автореф. дис. на

здобуття наукового ступеня канд. техн. наук : спец. 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» / В.В. Бандура. – Івано-Франковськ: ІФНТУНГ, 2003. – 19 с.

64. Сасенко В.В. Обґрунтування параметрів процесів гідротранспортування пульпи в технологіях переробки вугілля: дис. ... канд. техн. наук : 05.15.11 / Сасенко Вікторія Вікторівна. – Днепропетровск: ІГТМ НАНУ, 2002. – 150 с.

65. Семененко Е.В. Расчет параметров систем обратного водоснабжения технологий обогащения минерального сырья / Е.В. Семененко // Горн. электро-механика и автоматика: науч.-техн. сборник. – Днепропетровск. – 2005. – №74. – С. 79–85.

66. Семененко Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых россыпей / Е.В. Семененко. – К: Наук. думка, НАН Украины, 2011. – 229 с.

67. Богатырев Ю.Л. Обслуживание по состоянию / Ю.Л. Богатырев // Мир автоматики. – 2009. – №1–2. – С. 140–143.

68. Комплекс ресурсо- і енергозберігаючих геотехнологій видобутку та переробки мінеральної сировини, технічних засобів їх моніторингу із системою управління та оптимізації гірничорудних виробництв : монографія / А.А. Азарян, Ю.Г. Вілкул, Ю.П. Капленко, П.І. Пілов. – Кривий Ріг: Мінерал, 2006. – 219 с.

69. Соколов В.А. Диагностика электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В.А. Соколов // Новости электротехники. – 2008. – №1 (49).

70. Матвеев А.В. Диагностирование арматуры с электроприводом при помощи относительных электрических параметров / А.В. Матвеев, А.Ф. Складников // Арматуростроение. – 2009. – №3 (60). – С. 67–71.

71. Кутуков С.Е. Информационно-аналитические системы магистральных трубопроводов / С.Е. Кутуков. – М.: СИП РИА, 2002. – 324 с.

72. Модернизация ВПУ на основе современных отечественных технологий / А.В. Ерофеев, С.К. Добровский, И.А. Мельников, М.В. Репкин, Г.В. Ханларов // Повышение эффективности тепловых хозяйств предприятий: сборник трудов IV

Международной научно-практической конференции, 17–18 марта 2011 г. – СПб.: ГТУРП, 2011. – С. 29–34.

73. Калашникова Е. С. Переходные процессы в трубопроводном транспорте: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.05 / Калашникова Екатерина Сергеевна. – М.: РГУ нефти и газа, 2000. – 168 с.

74. Гультяев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс / А. Гультяев. – СПб.: Питер, 2000. – 432 с.

75. Бендат Д. Измерение и анализ случайных процессов / Д. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1971. – 408 с.

76. Петров Ю.П. Синтез оптимальных систем управления при не полностью известных возмущающих силах. Учебное пособие / Ю.П. Петров. – Л.: ЛГУ, 1987. – 289 с.

77. Шидловский А.К. Эффективные режимы работы электротехнологических комплексов / Г.Г. Пивняк, С.И. Выпанасенко, В.В. Слесарев. – Днепропетровск: НГА Украины, 2000. – 184 с.

78. Корсун В.И. Методы и системы адаптивной идентификации и управления технологическими процессами, использующие принципы симметрии: дис. ... доктора техн. наук: 05.13.03 / Корсун Валерий Иванович. – Днепропетровск: НГУ, 1999. – 355 с.

79. Солодовников А.И. Основы теории и методы спектральной обработки информации: учебное пособие / А.И. Солодовников, А.М. Спиваковский. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1986. – 272 с.

80. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях / Л.А. Залманзон. – М.: Наука, 1989. – 496 с.

81. Солодовников В.В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления / В.В. Солодовников. – М.: Физматгиз, 1960. – 655 с.

82. Сато Ю. Обработка сигналов. Первое знакомство / Ю. Сато. – М.: Додэка-XXI, 2002. – 176 с.

83. Развитие методов оценивания состояния ЭЭС на основе новых источников данных, технологий распределенных вычислений и методов искусственного интеллекта / А.З. Гамм, И.Н. Колосок, А.М. Глазунова, Ю.А. Гришин, Е.С. Коркина // Оперативное управление в электроэнергетике. – 2001. – №2. – С. 41–48.

84. Шадрина В.В. Разработка моделей принятия решений с применением методов искусственного интеллекта для задач магистрального транспорта газа: дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.17, 05.13.06 / Шадрина Валентина Вячеславовна. – Таганрог, 2007. – 179 с.

85. САУ свеклоперерабатывающего отделения АСУТП «Диффузия-321». Simatic. – К.: Сименс-Украина, 2008. – С. 244–245.

86. Шершнев А. СУ завалят обязанностями / А. Шершнев // Нефтегазовая вертикаль. – 2006. – №12. – С. 104–105.

87. Шенгур Н. СУ завалят обязанностями / Н. Шенгур // Нефтегазовая вертикаль. – 2006. – №12. – С. 97–98.

88. Кузьмин И.Ю. Система автоматического поддержания уровня воды в приемном отделении канализационной насосной станции КНС-415. Молодежь и современные информационные технологии / И.Ю. Кузьмин // Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых [«Молодежь и современные информационные технологии»] (Томск, 25–27 февраля 2009 г.). – Томск: СПБ Графикас, 2009. – ч. 2. – С. 60–62.

89. Смирнов Е.С. Применение искусственного интеллекта при определении координаты утечки в магистральных нефтепроводах. Молодежь и современные информационные технологии / Е.С. Смирнов, Е.И. Громаков // Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых [«Молодежь и современные информационные технологии»] (Томск, 25–27 февраля 2009 г.). – Томск: СПБ Графикас, 2009. – ч. 2. – С. 95–97.

90. Экспертная система диагностики электроцентробежных насосов / А.А. Пашали, М.Г. Волков, А.В. Жонин // Нефтегазовое дело. – 2009. – Т. 7 – №1. – С. 117–120.

91. Варбанец Р.А. Использование принципов нечеткой логики в экспертной системе технической диагностики судовых двигателей внутреннего сгорания / Р.А. Варбанец, В.Г. Ивановский, А.П. Бень // Штучний інтелект. – 2010. – №3. – С. 618–622.

92. Лютин К.И. Использование нейронно-сетевых моделей при виброакустической диагностики ДВС (на примере диагностики Кулачкового ГРМ): дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Лютин Константин Ильич. – Волгоград: ВГТУ, 2009. – 132 с.

93. Кобозев Е.В. Экспертная система прогнозирования состояния электрических двигателей на основе использования результатов их диагностики в условиях сельского хозяйства : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве» / Е.В. Кобозев. – Барнаул: 2009. – 20 с.

94. Каширских В.Г. Мониторинг состояния электродвигателей горных машин / В.Г. Каширских // Уголь. – 2005. – №9. – С. 37–38.

95. Основы управления гидроэнерготранспортными системами угольных шахт / В.И. Груба, Ф.А. Папаяни, Э.К. Никулин, А.С. Оглобченко. – Донецк: Донбасс, 1993. – 225 с.

96. Груба В.И. Автоматизированная система управления основным технологическим процессом гидрошахты / В.И. Груба // Известия вузов. Горный журнал. – 1992. – №10. – С. 10–13.

97. Доронина Е.Г. Разработка мультиагентной системы управления и поддержки принятия решений для обеспечения экологической безопасности воздушной среды региона : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.13.10 «Управление в социальных и экономических системах» / Е.Г. Доронина. – Старый Оскол: 2011. – 16 с.

98. Мандрыкин А.В. Автоматизация процессов управления на машиностроительном предприятии: учеб. пособ. / А.В. Мандрыкин. – Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2008. – Ч. 1. – 212 с.

99. История успеха: Оскольский электрометаллургический комбинат. Москва: SAPAG, 2001 г.
100. Иванов А.И. Создание автоматизированной системы управления технологическим процессом ДСП-150 (ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат») / А.И. Иванов // Межотраслевая конференция «Автоматизация производства – 2010»: сб. докладов. – М. – 2010. – С. 25–30.
101. IntmaGroup. Инструменты эффективного управления производством. – М.: Интма, 2006. – 22 с.
102. Wilo. Насосная азбука. – М.: Вило Рус, 2006. – 60 с.
103. Wilo. Инструкция по монтажу и эксплуатации. Dortmund-Hörde, WILO AG. – 2008. – 16 с.
104. ANDRITZ: Центробежные насосы с вертикальным спиральным корпусом. – Vienna: ANDRITZ, 2009. – 10 с.
105. Центробежные насосы ANDRITZ. Серия S. – Vienna.: ANDRITZ, 2009. – 10 с.
106. Система автоматики и управления. – Vienna: ANDRITZ-HYDRO, 2009. – 7 с.
107. IDEAS. Средства моделирования для горнорудных предприятий. ANDRITZ-Automation, 2008. – 12 с.
108. Система контроля и диагностики. – Vienna: ANDRITZ-HYDRO, 2009. – 7 с.
109. Система защиты. – Vienna: ANDRITZ-HYDRO, 2009. – 7 с.
110. Система синхронизации. – Vienna: ANDRITZ-HYDRO, 2009. – 7 с.
111. Wallace&Tiernan Chem-Ad® Series A Diaphragm Metering Pump. Vineland (NJ), Siemens Water Technologies, 2010. – 5 pp.
112. Siemens BACnet Heat Pump Controller – Multi-Stage Owner's Manual. Vineland (NJ), Siemens Water Technologies, 2009. – 35 pp/
113. STH Pump Controller Owner's Guide. Bella Vista, ADInstruments Pty Ltd, 2008. – 36 pp.

114. Mill Circuit Pump Manual. Madison (WI), Weir Minerals North America, 2009. – 58 pp.
115. Slurry Pump Handbook – 2009. Madison (WI), Weir Minerals North America, 2009. – 112 pp.
116. Slurry pumping manual. Madison (WI), Weir Minerals North America, 2002. – 66 pp.
117. Owner's manual. TankmasterTM4 automatic discharge pump controller. – Big Prairie (OH), Domestic Corp, 2009. – 12 pp.
118. «CPR» Pump Regulator Automatic Control System Operation Manual. Danville (KY), CPR, 2012. – 30 pp.
119. OPERATION & MAINTENANCE MANUAL Svedala Slurry Pump HM200. Rugby, Svedala Ltd, 2001. – 90 pp.
120. Monitoring Asset Health and Maximo.NY, Matrikon, 2009. – 36 pp.
121. Mobile equipment monitoring. NY, Matricon, 2009. – 23 pp.
122. Гребенкин А.А. АСУТП на предприятии ООО «Балаковские минеральные удобрения» / А.А. Гребенкин, Л.А. Неведацин, А.Н. Мамонтов // Промышленные контроллеры АСУ. – 2002. – №10. – С.1–5.
123. Автоматизированное рабочее место оператора-диагноста. Труды конференции «Актуальные проблемы и новые технологии освоения месторождений углеводородов Ямала в XXI веке», 2004 г.
124. Научно-технические аспекты создания новых объектно-ориентированных систем контроля, диагностирования и аварийной защиты / Ф.М. Дедученко, А.Г. Ананенков, Г.П. Ставкин, О.П. Андреев, А.К. Арабский // Сб. трудов международного газового конгресса. – СПб. – 2003.
125. Дедученко Ф.М. Унифицированные средства контроля, диагностирования и защиты оборудования и технологических процессов ТЭК / Ф.М. Дедученко // Конверсия в машиностроении. – 1996. – №5. – С. 28–34.
126. Итоговый отчет о научной и научно-организационной деятельности в 2011 году. – Новосибирск: ФГБУН КТИ Вычислительной техники, 2012. – 82 с.

127. Бетрозов О.М. Разработка подсистемы автоматизированной оценки сложности САР параметров технологических объектов для САПР систем управления: дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.12/ О.М. Бетрозов. – Владикавказ, 2007. – 172 с.

128. Системы диспетчерского контроля и управления. Программные комплексы 2011. – М.: Вира Реалтайм, 2011. – 44 с.

129. Смородов Е.А. Методы повышения надёжности и эффективности технологического и энергетического оборудования добычи и транспорта нефти и газа: дис. доктора техн. наук : 05.02.13; 05.26.03 / Смородов Евгений Анатольевич. – Уфа, 2004. – 315 с.

130. Цапко И.В. Метод диагностирования штанговых глубинных насосных установок: дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Цапко Ирина Валериевна. – Томск, 1999. – 146 с.

131. 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.

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

133. 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.

134. 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.

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

136. Приходченко С.Д. Определение причинно-следственных связей диагностических параметров и состояний системы внутрифабричного гидротранспорта / С.Д. Приходченко // Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості : матеріали VIII Міжнар. конф., 19 вересня 2011 р. – Дніпропетровськ, 2011. – С. 322–326.

137. 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.

138. 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.

139. 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.

140. 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.

141. Методика разработки системы поддержки принятия решений для управления технологиями гидротранспорта на горных предприятиях. – Днепропетровск: НГУ-ИГТМ, 2009 г.

142. 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.

143. 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.

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

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

146. 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.

147. 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.

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

149. 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.

150. 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.

151. Приходченко С.Д. Застосування суматора, що здатен до навчання, в системі підтримки прийняття рішень для внутріфабричного гідротранспорту /

С.Д. Приходченко // Гірнич електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2010. – Вип. 85. – С. 96–102.

152. Приходченко С.Д. Критерии оценки и статистическая обработка результатов диагностики состояния систем гидротранспортирования / Т.А. Желдак, С.Д. Приходченко // Гірнич електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2012. – Вип. 89. – С. 83–87.

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

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача

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 // Гірнича 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 // Гірнича 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 гидратранспортирования пульпы в шламохранилища / С.Д. Приходченко // Metallургическая 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. Udovyyk, 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. Моделирование і управління системою внутрішньофабричного 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 // Гірнича 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.

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Список «Елемент-Несправність/Відмова-Ознака»

№ з/п	Пошкоджений елемент	Вид ушкодження	Симптом	Рада операторові	Несподіваність
1	2	3	4	5	6
1	Ротор	Виткове замикання	Двигун приходить в обертання при розімкненому фазному роторі	1. Перевірити магнітним ярмом	
2	Ротор	Перегрів	1. Погіршення вентиляції	1. Прочистити вентиляційні канали	
3	Ротор	Перегрів	2. Підвищений струм в роторі в результаті зниженої напруги живлячої мережі	2. Перевірити лінійну напругу і струм ротора (для фазного ротора)	
4	Ротор	Перегрів	3. Підвищений струм в роторі в результаті перевантаження	3. Перевірити навантаження	
5	Ротор	Перегрів	4. Підвищений струм в роторі в результаті распайки з'єднань	4. Перевірити місця пайки, опір ротора (для фазного ротора)	
6	Ротор	Тріщина	Перегрів електродвигуна		
7	Ротор	Руйнування	Спрацьовування захисту		+
8	Ротор	Руйнування	Характерна серія віброактивності		+
9	Ротор	Стирання (небаланс ротора)	Механічні коливання струсу електродвигуна	Перевірити балансування ротора	
10	Ротор	Руйнування обмотки	Значення струму, що споживається електродвигуном, періодично коливається		
11	Ротор	Руйнування обмотки	Двигун зупиняється при збільшенні навантаження. Пусковий або максимальний момент недостатній	Перевірити струм короткого замикання або трансформацію (фазного ротора)	

Продовження табл. Б.1

1	2	3	4	5	6
12	Ротор	Руйнування обмотки	Механічні коливання струсу електродвигуна	Перевірити струм короткого замикання	
13	Ротор	Руйнування обмотки	Двигун дає знижене число обертів за хвилину	Перевірити струм короткого замикання	
14	Ротор	Руйнування обмотки	Двигун не розгортається (застрягає при малих частотах обертання і гуде)	Перевірити опір фаз обмотки ротора і пускового реостата	
15	Ротор	Руйнування обмотки	При включенні спрацьовує максимальний захист	Перевірити ізоляцію обмоток відносно корпусу	
16	Ротор	Руйнування обмотки	При включенні спрацьовує максимальний захист	Перевірити ізоляцію обмоток між фазами	
17	Ротор	Вигорання контактів	Підвищений струм в роторі в результаті распайки з'єднань		
18	Ротор	Переки́с	Зростання споживаної потужності		
19	Ротор	Переки́с	Нагрів підшипників і стійки		
20	Ротор	Переки́с	Підвищена вібрація		
21	Статор	Виткове замикання	Двигун зупиняється при збільшенні навантаження. Пусковий або максимальний момент недостатній	Перевірити опори обмоток фаз	+
22	Статор	Перегрів	Підвищений струм в обмотці статора в результаті обриву в одному з трьох провідників живлячої лінії в ланцюзі одному з фаз обмотки статора	Перевірити запобіжник, а також напругу між дротами лінії і струм в них	

Продовження табл. Б.1

1	2	3	4	5	6
23	Статор	Перегрів	Підвищений струм в обмотці статора в результаті підвищеної або зниженої напруги в мережі	Перевірити напругу між дротами живлячої лінії і струм в них	
24	Статор	Перегрів	Підвищений струм в обмотках статора в результаті перевантаження	Перевірити напругу між дротами живлячої лінії і струм в них	
25	Статор	Руйнування обмотки	Двигун не запускається без навантаження	Перевірити запобіжник, або струм в живлячих дротах або опір обмоток фаз	+
26	Статор	Руйнування обмотки (обрив в одному з трьох обмоток фаз статора електродвигуна при включенні в зірку)	Двигун зупиняється при збільшенні навантаження. Пусковий або максимальний момент недостатній	Перевірити схему з'єднання обмоток	+
27	Статор	Руйнування обмотки (обрив в одному з трьох обмоток фаз статора електродвигуна при включенні в трикутник)	Двигун зупиняється при збільшенні навантаження. Пусковий або максимальний момент недостатній	Перевірити опори обмоток фаз	+

Продовження табл. Б.1

1	2	3	4	5	6
28	Муфта	Тріщина	Аналогічно з'єднанням муфти		
29	Муфта	Руйнування	Аналогічно з'єднанням муфти		
30	Муфта	Стирання	Аналогічно з'єднанням муфти		
31	Вал	Тріщина			
32	Вал	Руйнування	Зупинка робочого колеса при роботі електродвигуна		+
33	Вал	Руйнування	Спрацьовування захисту		+
34	Вал	Руйнування	Характерна серія віброактивності		+
35	Вал	Корозія	Зміна частоти вібрації		
36	Вал	Перекручення	Перегрівання підшипників		
37	Вал	Перекручення	Зміна частоти вібрації		
38	Вал	Стирання	Зміна частоти вібрації		
39	Вал	Прогин	Двигун не розвиває нормальну частоту обертання і гуде	Одностороннє тяжіння ротора	
40	Вал	Прогин	Підвищена вібрація		
41	Робоче колесо	Тріщина			
42	Робоче колесо	Руйнування	Падіння тиску		+
43	Робоче колесо	Руйнування	Заклинювання колеса		+
44	Робоче колесо	Стирання	Падіння подачі і тиску		
45	Робоче колесо	Стирання	Підвищення споживаної потужності		
46	Робоче колесо	Стирання	Підвищена вібрація	Розбалансування	
47	Робоче колесо	Расцентровка	Падіння подачі і тиску	Розбалансування	
48	Робоче колесо	Расцентровка	Підвищена вібрація	Розбалансування	
49	Робоче колесо	Расцентровка	Підвищення споживаної потужності	Розбалансування	

Продовження табл. Б.1

1	2	3	4	5	6
50	Робоче колесо	Корозія			
51	Робоче колесо	Заклинювання	Падіння тиску до нуля	Попадання чужорідного тіла	
52	Робоче колесо	Замулювання	Падіння тиску		
53	Корпус насоса	Тріщина	Падіння тиску		
54	Корпус насоса	Руйнування	Падіння тиску до нуля		
55	Корпус насоса	Корозія			
56	Корпус насоса	Крізний отвір	Падіння тиску		
57	Корпус насоса	Протікання	Падіння тиску		
58	Корпус насоса	Повітряна подушка	Падіння тиску		
59	Засувка	Заклинювання	Падіння подачі		
60	Ролики	Перегрів	Порушення центрування агрегату	1. Немає мастила, забруднене мастило	
61	Ролики	Перегрів	Стирання підшипників	2. Непідходящий сорт мастила	
62	Ролики	Перегрів		3. Не обертається кільце	
63	Ролики	Перегрів		4. Знос підшипника	
64	Ролики	Тріщина			
65	Ролики	Стирання	Двигун не розвиває нормальну частоту обертання і гуде	Перевірити проміжок між статором і ротором	
66	Ролики	Стирання	Механічні коливання струс електродвигуна	Перевірити проміжок в підшипниках і їх установку	
67	Ролики	Крізний отвір			
68	Мастильні кільця	Перегрів	Перегрівання підшипників		
69	Мастильні кільця	Тріщина	Перегрівання підшипників		
70	Мастильні кільця	Руйнування	Перегрівання підшипників		

Продовження табл. Б.1

1	2	3	4	5	6
71	Мастильні кільця	Корозія	Перегрівання підшипників		
72	Мастильні кільця	Стирання	Перегрівання підшипників		
73	Кришки	Перегрів			
74	Кришки	Тріщина	Підвищена вібрація		
75	Кришки	Руйнування	Підвищена вібрація		
76	Кришки	Руйнування			
77	Кришки	Корозія			
78	Кришки	Стирання	Перегрівання підшипників		
79	Підшипники	Перегрів			
80	Підшипники	Перегрів			
81	Сальники	Руйнування	Падіння тиску		
82	Сальники	Стирання	Падіння тиску	Знос ущільнення	
83	Сальники	Стирання	Падіння тиску	Перекіс валу	
84	Сальники	Крізний отвір	Падіння тиску	Підсмоктування повітря	
85	Сальники	Крізний отвір	Зменшення подачі	Підсмоктування повітря	
86	Сальники	Крізний отвір	Зменшення допустимої висоти всмоктування	Підсмоктування повітря	
87	Сальники	Протікання	Падіння тиску		
88	Сальники	Ущільнення	Протікання сальників		
89	Опора	Тріщина	Підвищена вібрація		
90	Опора	Руйнування	Підвищена вібрація		
91	Опора	Корозія			
92	Фундамент	Тріщина	Підвищена вібрація		
93	Фундамент	Руйнування	Підвищена вібрація		
94	Фундамент	Корозія			

Продовження табл. Б.1

1	2	3	4	5	6
95	Фундамент	Розхитування	Підвищена вібрація		
96	Трубопровід, що підводить	Тріщина	Зменшення подачі	Підсмоктування повітря	
97	Трубопровід, що підводить	Тріщина	Зменшення допустимої висоти всмоктування	Підсмоктування повітря	
98	Трубопровід, що підводить	Руйнування	Падіння подачі до нуля		+
99	Трубопровід, що підводить	Корозія	Зменшення подачі		
100	Трубопровід, що підводить	Корозія	Кавітація		
101	Трубопровід, що підводить	Замулювання трубопроводу	Зменшення подачі		
102	Трубопровід, що підводить	Замулювання трубопроводу	Кавітація		
103	Трубопровід, що підводить	Протікання	Зменшення подачі		
104	Трубопровід, що підводить	Розхитування	Підвищена вібрація		
105	Трубопровід, що відводить	Тріщина			
106	Трубопровід, що відводить	Руйнування	Зменшення гідравлічного опору		+
107	Трубопровід, що відводить	Корозія	Збільшення гідравлічного опору		
108	Трубопровід, що відводить	Замулювання трубопроводу	Збільшення гідравлічного опору		

Продовження табл. Б.1

1	2	3	4	5	6
109	Трубопровід, що відводить	Крізний отвір	Падіння тиску		
110	Трубопровід, що відводить	Протікання	Падіння тиску		
111	Трубопровід, що відводить	Розхитування	Періодичне падіння тиску		
112	З'єднання Ротор-муфта	Руйнування	Зупинка робочого колеса при роботі електродвигуна		+
113	З'єднання Ротор-муфта	Руйнування	Спрацьовування захисту		+
114	З'єднання Ротор-муфта	Руйнування	Характерна серія віброактивності		+
115	З'єднання Ротор-муфта	Розхитування	Перегрівання підшипників		+
116	З'єднання Ротор-статор	Руйнування	Заклинювання ротора		
117	З'єднання Ротор-статор	Розхитування	Двигун не розвиває нормальну частоту обертання і гуде	Одностороннє тяжіння ротора	
118	З'єднання Ротор-статор	Розхитування	Перегрівання підшипників	Одностороннє тяжіння ротора	
119	З'єднання Ротор-статор	Розхитування	Підвищена вібрація	Одностороннє тяжіння ротора	+
120	З'єднання Вал-муфта	Руйнування	Зупинка робочого колеса при роботі електродвигуна		+
121	З'єднання Вал-муфта	Руйнування	Спрацьовування захисту		+

Продовження табл. Б.1

1	2	3	4	5	6
122	З'єднання Вал-муфта	Руйнування	Характерна серія віброактивності		
123	З'єднання Вал-муфта	Розхитування	Підвищена вібрація		
124	З'єднання Вал-муфта	Розхитування	Перегрівання підшипників		
125	З'єднання Вал-Робоче колесо	Руйнування			
126	З'єднання Вал-Робоче колесо	Розхитування	Підвищена вібрація		
127	З'єднання Опора-підшипник	Руйнування	Підвищена вібрація		+
128	З'єднання Опора-підшипник	Розхитування	Підвищена вібрація		
129	З'єднання Опора-фундамент	Руйнування	Підвищена вібрація		+
130	З'єднання Опора-фундамент	Розхитування	Підвищена вібрація		
131	З'єднання Насос-Трубопроводи	Руйнування	Падіння тиску		+
132	З'єднання Насос-Трубопроводи	Розхитування	Зменшення подачі	Підсмоктування повітря	

Продовження табл. Б.1

1	2	3	4	5	6
133	З'єднання Насос-Трубопроводи	Розхитування	Зменшення допустимої висоти всмоктування	Підсмоктування повітря	
134	З'єднання Насос-Трубопроводи	Крізний отвір	Зменшення подачі	Підсмоктування повітря	
135	З'єднання Насос-Трубопроводи	Крізний отвір	Зменшення допустимої висоти всмоктування	Підсмоктування повітря	
136	З'єднання Насос-Трубопроводи	Протікання	Зменшення подачі		
137	З'єднання Насос-Трубопроводи	Протікання	Зменшення тиску		
138	З'єднання Проводка-двигун	Перегрів			
139	З'єднання Проводка-двигун	Тріщина			
140	З'єднання Проводка-двигун	Руйнування	Відсутність струму і напруги		+
141	Електропро-водка	Замикання	Спрацьовування захисту		
142	Електропро-водка	Руйнування	Двигун не запускається без навантаження	Перевірити лінійну напругу.	
143	Пульпа	Кавітація	Підвищена вібрація	Зменшити подачу	
144	Пульпа	Кавітація	Підвищена вібрація	Відкрити вхідну заслінку	
145	Пульпа	Кавітація	Підвищена вібрація	Прочистити трубопровід, що підводить	

Продовження табл. Б.1

1	2	3	4	5	6
146	Пульпа	Кавітація	Падіння тиску		
147	Пульпа	Кипіння	Підвищена вібрація		
148	Пульпа	Кипіння	Підвищена температура		
149	Пульпа	Збільшення щільності	Зменшення подачі		
150	Пульпа	Помпаж	Підвищена вібрація		

ДОДАТОК В

КОПІЯ



Акт

производственных испытаний экспериментального образца системы сбора и обработки электрических показателей (I, U, W) для контроля и диагностики режимов работы шламового насоса 8-ГРк, разработанной на кафедре ПОКС НГУ асс Приходченко С.Д., состоящей из адаптера АЦП в комплекте с переносным компьютером и датчиками.

г. Комсомольск

21 июня 2006 г.

Комиссия в составе: начальника научно-инженерного центра ОАО «Полтавский горнообогатительный комбинат» к.т.н. Зенина В.А., начальника лаборатории автоматизации НИЦ ОАО «Полтавский ГОК» Бурмака Е.З., электрика участка флотации обогатительной фабрики №2 ОАО «Полтавский ГОК» Шептицкого А.Ю. и ассистента кафедры ПОКС НГУ Приходченко С.Д. составила настоящий акт о результатах производственных испытаний адаптера РМ453, в комплексе с токоизмерительными клещами РК435 и переносным компьютером Toshiba «Тесра 8200» для контроля электрических показателей (I, U, W) приводного двигателя 5АМЗ1563 шламового насоса 8-ГРк и ввода в реальном времени этих показаний в компьютер с целью диагностики технологического и технического состояния работы шламового насоса. Испытания проведены 15.06.2006 г. на участке флотации обогатительной фабрики №2 ОАО «Полтавский ГОК».

На основании протокола производственных испытаний комиссия считает что экспериментальный образец системы сбора и обработки электрических показателей выдержал производственные испытания, доказана его работоспособность в условиях промышленной работы ГОКа и перспективность для автоматизированного контроля и оперативного ввода электрических показателей (I, U, W) двигателя шламового насоса, и рекомендует:

- использовать метод контроля электрических показателей (I, U, W) для диагностики и автоматизированного управления технологическими и техническими режимами работы шламовых насосов;
- улучшить пылевлагозащищенность адаптера;
- в дальнейших разработках использовать совместно интерфейсы передачи RS-485 и RS-232.

Члены комиссии:



(подпись)
(подпись)
(подпись)
(подпись)

Зенин В.А.

Бурмак Е.А.

Шептицкий А.Ю.

Приходченко С.Д.

ДОДАТОК Г

КОПІЯ

Журнал

производственных испытаний экспериментального образца
системы сбора и обработки электрических показателей (I, U, W)
для контроля и диагностики технологических и технических режимов работы
шламового насоса 8-ГРк.

Комсомольск

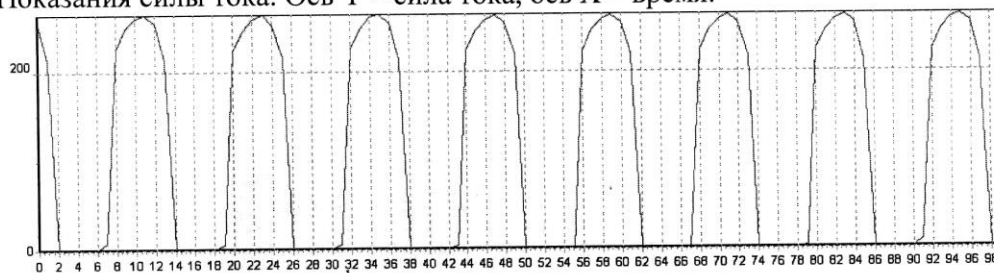
21 июня 2006 г.

Комиссия в составе: начальника научно-инженерного центра ОАО «Полтавский горнообогатительный комбинат» Зенина В.А., начальника лаборатории автоматизации НИЦ ОАО «Полтавский ГОК» Бурмака Е.З., электрика участка флотации обогатительной фабрики №2 ОАО «Полтавский ГОК» Шептицкого А.Ю. и ассистента кафедры ПОКС НГУ Приходченко С.Д. составила настоящий журнал производственных испытаний экспериментального образца системы сбора и обработки электрических показателей для автоматизированного контроля и диагностики технологических и технических режимов работы шламового насоса 8-ГРк и ввода в реальном времени информационных параметров в компьютер.

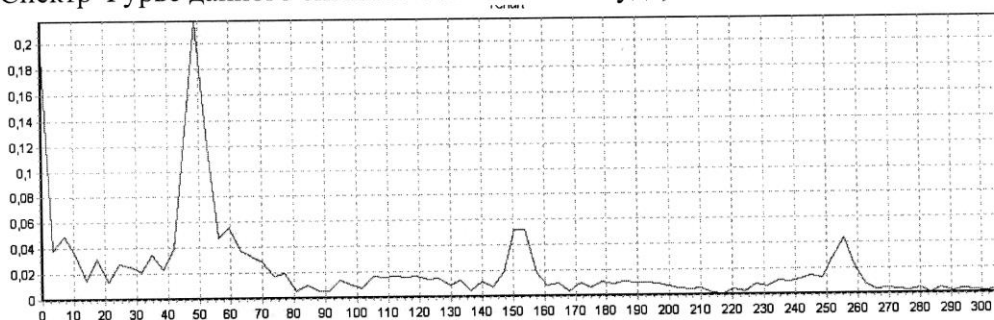
Испытание № 1.

Обогатительная фабрика №2. Участок флотации. Насос №5760. Время 11.36
Заслонка открыта на 100%. Плотность пульпы = 1,02 кг/дм³.

Показания силы тока. Ось Y – сила тока, ось X – время.



Спектр Фурье данного сигнала. Ось Y – амплитуда, ось X – частота.



Продовження дод. Г

КОПІЯ

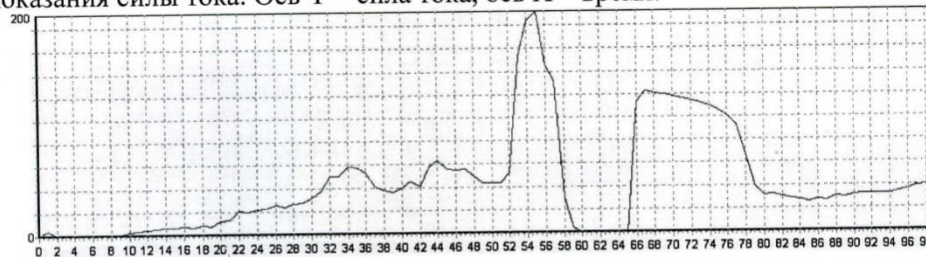
Испытание № 8.

Обогащительная фабрика №2. Участок флотации. Насос №5760. Время 14.16

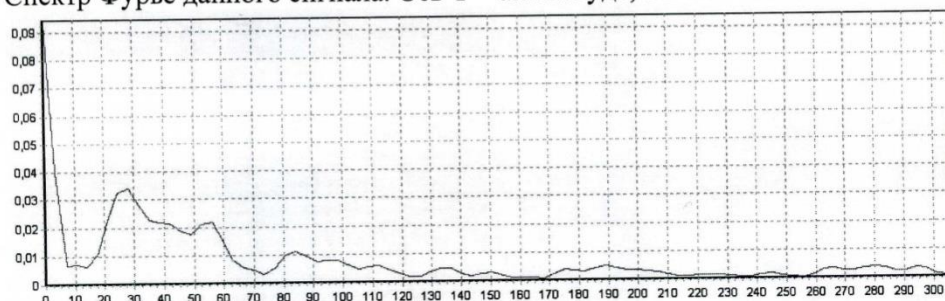
Заслонка открыта на 100%. Плотность пульпы = $1,40 \text{ кг/дм}^3$.

Аварийная ситуация. Отключение двигателя.

Показания силы тока. Ось Y – сила тока, ось X – время.



Спектр Фурье данного сигнала. Ось Y – амплитуда, ось X – частота.



Данные 30 экспериментов записаны на цифровом носителе CD-ROM, приложенном к данному журналу.

Члены комиссии:



Зенин В.А.

Бурмак Е.А.

Шептицкий А.Ю.

Приходченко С.Д.

ДОДАТОК Д

КОПІЯ

Министерство науки и образования Украины
Национальный горный университет

Утверждаю
Проректор по научной
работе Национального
горного университета
докт. техн. наук, проф..
« » А.С. Бешта
2009г.



Методика
разработки системы поддержки принятия решений
для управления технологиями гидротранспорта
на горных предприятиях

Заведующий кафедрой программного
обеспечения компьютерных систем НГУ,
канд. техн. наук, проф.

М.А. Алексеев

Исполнитель
ассистент кафедры программного
обеспечения компьютерных систем НГУ

С.Д. Приходченко

Днепропетровск

2009

Продовження дод. Д

КОПІЯ

Содержание

1 Вступление	3
2 Общая часть	4
3 Программа исследований	6
4. Методика и последовательность исследований ваттметрографических сигналов	7
5 Методика внедрения системы поддержки принятия управляющих гидротранспортом решений NGU-Hydra 1.0	14
Заключение	16
Литература	17

Продовження дод. Д

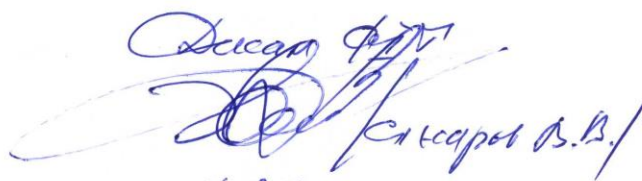
КОПІЯ

Заключення

Система підтримки прийняття управляючих рішень внутріфабричним гідротранспортом NGU-Hydra являється образцом робочого місця оператора гідротранспортного узла, т.к. данна система може виводити в режимі реального часу всю необхідну інформацію про стані гідротранспортної системи і її важливішого узла – шламового насоса.

При цьому, NGU-Hydra має важливу особливість – можливість підказки оператору про ймовірних шляхах розвитку подій і діях для розв'язання складившоїся ситуації, а також попередження про аварійно-небезпечних режимах роботи або наслідках певного неправильного дії оператора.

В даний час аналогів даного продукту не існує, відповідно, система NGU-Hydra може бути рекомендована для застосування на гірничо-обогатительних підприємствах, використовують технологію гідротранспортування відходів обогачення і доставки вихідної руди на обогатительную фабрику.

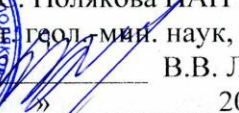

16.10.09

ДОДАТОК Е

КОПІЯ

Согласовано
Проректор по научной
работе Национального
горного университета МОН Украины
докт. техн. наук, проф..

А.С. Бешко
2009г.

Утверждаю
Заместитель директора
Института геотехнической механики
ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины
докт. геол.-мий. наук, проф..

В.В. Лукинов
2009г.




Акт

**внедрения «Методики разработки системы поддержки принятия
решений для управления технологиями гидротранспорта на горных
предприятиях»**

Мы, нижеподписавшиеся, представители организации-разработчика Национального горного университета МОН Украины, заведующий кафедрой программного обеспечения компьютерных систем, канд. техн. наук, проф. М.А. Алексеев, ассистент кафедры программного обеспечения компьютерных систем НГУ С.Д. Приходченко с одной стороны, и представители Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины заведующий отделом геодинамических систем и вибрационных технологий докт. техн. наук, проф. Б.А. Блюсс, старший научный сотрудник, канд. техн. наук Е.В. Семененко, подтверждаем, что в Институте геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины внедрена «Методика разработки системы поддержки принятия решений для управления технологиями гидротранспорта на горных предприятиях».

В методике содержатся рекомендации по выбору средств контроля и технические требования по выполнению диагностики ваттметрографических сигналов приводного двигателя шламового насоса систем гидротранспорта на горно-обогатительных предприятиях. Сформулированы общие принципы оценки параметров системы «шламовый насос – комплекс гидротранспорта» на базе анализа результатов регистрации и выделения энергоинформационных сигналов потребляемого тока, напряжения, мощности, и статистической обработки данных штатных и нештатных состояний гидротранспортных систем предприятия.

Разработанный в методике вариант диагностики состояния гидротранспорта основан на регистрации значений потребляемой мощности электродвигателя за определенный период; разложения исходного сигнала на основе преобразований Фурье и Хаара в спектры, и выделения информативных данных из полученных спектров.

Продовження дод. Е

КОПІЯ

При исследовании системы гидротранспорта показано, что движущиеся детали системы генерируют собственные колебания с частотой, равной отношению основной частоты двигателя к передаточному числу, анализ которых позволил выявить зависимость спектра энергоинформационных сигналов от состояния работающей гидротранспортной системы.

Результатами исследований доказаны преимущества энергоинформационной диагностики, с учетом оперативности получения первичных данных и внесения изменений в режимы контроля, на основе разработанного программного комплекса системы поддержки принятия решений NGU-Hydra 1.0.

Мониторинг состояния системы гидротранспортирования по данным изменения потребляемой мощности, а также по изменениям спектров энергоинформационных сигналов, позволяет определить рациональные параметры технологического процесса гидротранспортирования, возможные неисправности в системе, уменьшить количество аварийных ситуаций и снизить энергопотребление системы гидротранспорта на горных предприятиях.

Методический подход, предложенный в «Методике разработки системы поддержки принятия решений для управления технологиями гидротранспорта на горных предприятиях», используется при разработке технических требований и систем управления в технологиях добычи и переработки минерального сырья.

Заведующий кафедрой программного обеспечения компьютерных систем НГУ, канд. техн. наук, проф.



М.А. Алексеев

Исполнитель

ассистент кафедры программного обеспечения компьютерных систем



С.Д. Приходченко

Заведующий отделом геодинимических систем и вибрационных технологий ИГТМ НАН Украины, докт. техн. наук, проф.



Б.А. Блюсс

Старший научный сотрудник, канд. техн. наук,



Е.В. Семененко

ДОДАТОК Ж

КОПІЯ

Затверджую
Проректор з науково-дослідної роботи
ДВНЗ Придніпровської державної
академії
будівництва та архітектури



доктор технічних наук, проф.
Савицький М.В.

28.09.2011

АКТ

впровадження в навчальний процес
пакету програмного забезпечення NGU-Hydra

В даний час, в умовах постійного зростання цін на енергоносії, будь-яке виробництво прагне по можливості скоротити свої витрати в енергетичній сфері. Значною мірою ця тенденція властива як великим гірничо-збагачувальним підприємствам, на яких вага енергоносіїв у собівартості продукції, що випускається, перевищує 50%, так і підприємствам будівельної галузі, на яких однією з важливих статей витрат є витрати на транспортування будівельних матеріалів.

При системному підході до проблеми зниження витрат на енергоносії підприємства діють у всіх можливих напрямках підвищення продуктивності роботи. Так, обладнання зі значним ступенем зносу в більшості випадків замінюють на більш сучасне, що відповідає всім вимогам економічності. У той же час, устаткування, що не повністю використало свій ресурс, модернізують, часто використовуючи при цьому сучасні системи управління, призначені для вибору і підтримання оптимального режиму роботи.

При транспортуванні деяких видів будівельних матеріалів, таких, як пісок і бетон, застосовується трубопровідне транспортування даних матеріалів. ДВНЗ "Національний гірничий університет" володіє великим досвідом у розрахунках параметрів трубопровідних систем і методів аналізу стану агрегатів і вузлів систем гідротранспортування.

Асистентом кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Приходченко С.Д. розроблена методика аналізу стану систем гідротранспорту за показниками активної споживаної потужності приводного електродвигуна шламового насоса, що дозволяють проводити аналіз трубопровідної системи в умовах геометрії трубопроводу, що може змінюватися, зносу устаткування і зміни структури і складу матеріалу, що транспортується, і пропонувати оператору насосної установки варіанти подальших дій з описом їх наслідків.

Продовження дод. Ж

КОПІЯ

Ця методика базується на відомих моделях напірної течії гідросуміші, удосконалених з урахуванням можливої зміни умов процесу гідротранспортування і зносу устаткування. Отримані наукові результати покладені в основу програмних моделей, що мають властивість підстроювання під поточні умови і вдосконалюваних в процесі роботи з урахуванням попередніх подій і рішень оператора системи гідротранспорту.

Розроблений С.Д. Приходченко комплект методики та прикладних програм для аналізу та підтримки прийняття керуючих рішень для системи гідротранспорту включає:

- Методику розробки системи підтримки прийняття рішень для управління технологіями гідротранспорту на гірничих підприємствах;
- Програмний комплекс NGU-Hydra.

Ці наукові розробки ДВНЗ "Національний гірничий університет" передані на кафедру автоматики та електротехніки ДВНЗ ПДАБА, де використовуються при підготовці методичного забезпечення і викладання дисциплін "Автоматизація систем управління технологічними процесами", "Автоматизація технологічних процесів у будівельному виробництві", а також при виконанні курсових і дипломних проектів студентами спеціальності 7.092501 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології".

Завідувач кафедрою
автоматики та електротехніки
доктор технічних наук, професор


Еріванцев І.М.

Доцент кафедри
автоматики та електротехніки
кандидат технічних наук


Ткачов В.С.

ДОДАТОК И

КОПІЯ

Затверджую

проректор з наукової роботи

Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту

ім. В. Лазаряна



доктор технічних наук, проф..

Мямлін С.В.

20.09.2011

АКТ

впровадження в навчальний процес

пакета методики і програмного забезпечення NGU-Hydra

для автоматизації режиму роботи гідротранспорту

В даний час залізницями України перевозяться значні обсяги сипучих вантажів, серед яких вугілля, пісок, рудні концентрати, мінеральні добрива сировина для металургійної та хімічної промисловості, будівництва і гірничо-видобувної галузі. Висока інтенсивність перевезень і специфіка перевезення вантажів визначають вимоги до забезпечення екологічності перевезення таких вантажів, запобігання аварій з такими, і якнайшвидшого видалення викидів таких вантажів, що виникли в аварійній ситуації.

Перспективним методом збору та транспортування великого обсягу сипучих матеріалів є їх змив водою, і транспортування отриманої пульпи до місця акумуляції та дезактивації у разі активної речовини. Перевагами такого методу є екологічна безпека, компактність, мала кількість обслуговуючого персоналу і повна пожежобезпечність.

Широке розповсюдження даного методу стримується відсутністю методик застосовуваних для аналізу стану розгорнутої системи гідротранспортування.

ДВНЗ "Національний гірничий університет" володіє великим досвідом у розрахунках параметрів трубопровідних систем і методів аналізу стану агрегатів і вузлів систем гідротранспортування.

Асистентом кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Приходченко С.Д. розроблена методика аналізу стану систем гідротранспорту

Продовження дод. И

КОПІЯ

за показаннями активної споживаної потужності приводного електродвигуна шламового насоса, що дозволяє проводити аналіз трубопровідної системи в умовах мінливої геометрії трубопроводу, зносу устаткування і зміни структури і складу матеріалу, що транспортується, і пропонувати оператору насосної установки варіанти подальших дій з описом їх наслідків. Пропоновані оператору рішення дозволяють регулювати подачу насоса і здійснювати вибір оптимального режиму роботи обладнання.

Ця методика заснована на відомих моделях напірної течії гідросуміші, і операторному методі ланцюгових дробів, що описує моделі шламового насоса і систему гідротранспорту, удосконалених з урахуванням можливої зміни умов процесу гідротранспортування і зносу устаткування. Отримані наукові результати покладені в основу програмних моделей, що мають властивість підстроювання під поточні умови, і вдосконалюємих в процесі роботи, з урахуванням попередніх подій і рішень оператора системи гідротранспорту. Досягається оптимальний режим роботи шламового насоса з мінімізацією його енергоспоживання.

Розроблений С.Д. Приходченко комплект методики і прикладних програм для аналізу та підтримки прийняття керуючих рішень для системи гідротранспорту включає:

- Методику розробки системи підтримки прийняття рішень для управління технологіями гідротранспорту на гірничих підприємствах;
- Програмний комплекс NGU-Hydra.

Ці наукові розробки ДВНЗ "Національний гірничий університет" передані на кафедру гідравліки та водопостачання ДНУЗТ, де використовуються при підготовці методичного забезпечення і викладання дисциплін "насосні і повітродувні станції", а також при виконанні дипломних проектів студентами спеціальності 8.092601 "Водопостачання та водовідведення", а саме розділу «Розрахунок і проектування насосної станції».

Завідувач кафедрою
гідравліки та водопостачання
доктор технічних наук, професор

 М.М. Біляєв

Доцент кафедри
гідравліки та водопостачання
кандидат технічних наук

 Л.Ф. Долина

ДОДАТОК К**КОПІЯ**

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ им. Н.С. ПОЛЯКОВА**

Утверждаю



Директор
ИГТМ НАН Украины
академик НАН Украины

А.Ф. Булат

04 2012 г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

по оценке основных технических и технологических
параметров переработки углесодержащих отходов горного
производства с использованием программного обеспечения
«Перспектива»

Днепропетровск – 2012

Продовження дод. К

КОПІЯ

2

УДК 622.7.098 : 004.62

Методические рекомендации по оценке основных технических и технологических параметров переработки углесодержащих отходов горного производства с использованием программного обеспечения «Перспектива». – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2012. – 17 с.

Методические рекомендации разработаны Институтом геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины в рамках выполнения научно-исследовательской темы «Исследовать и установить параметры способов термической переработки шламов и некондиционного угля для разработки энерготехнологического комплекса по их утилизации» и определяют основные принципы построения и оценки параметров энерготехнологического комплекса по переработке углесодержащих отходов горного производства.

Документ содержит методические рекомендации по оценке основных параметров технологии переработки углесодержащих отходов и обоснованию рационального варианта энерготехнологического комплекса модульного типа с использованием программного обеспечения ИГТМ НАН Украины «Перспектива», а также краткие исходные технические требования к углеотходам для различных областей их применения.

Методические рекомендации предназначены для инженерно-технических работников горной промышленности, научных сотрудников научно-исследовательских и учебных институтов, а также специалистов, занимающихся практикой переработки некондиционных углей и отходов углеобогащения.

В разработке Методических рекомендаций принимали участие: старшие научные сотрудники кандидаты технических наук И.Н. Слащев, С.А. Курносов, В.Л. Приходченко, аспирант Э.С. Ключев, инженеры С.Д. Приходченко, А.И. Слащев.

Продовження дод. К

КОПІЯ

3

СОДЕРЖАНИЕ

1. Принцип построения энерготехнологического комплекса модульного типа	4
2. Преимущества использования программы «Перспектива» для определения параметров технологии переработки углесодержащих отходов	6
3. Назначение программного обеспечения	7
4. Структура программы	7
5. Инструкция по применению программы для оценки основных технических и технологических параметров переработки углесодержащих отходов	8
Заключение	11
Приложение А Нормативные требования к отходам угледобычи	12
Приложение Б Нормативные требования к золам, применяемым для производства бетонов	13
Приложение В Краткий перечень нормативно-технических документов, регламентирующих требования и ограничения на производство строительных материалов	15

ДОДАТОК Л

КОПІЯ

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ им. Н.С. ПОЛЯКОВА

Директор

обогатительной фабрики
«ТАНДЕМ» ТОВ ТПК
Р.Ю. Бережко
04 2012 г.



Директор

ИГТМ НАН Украины
академик НАН Украины
А.Ф. Булат
«4» 04 2012 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ

по эффективному использованию способов термической
переработки отходов углеобогащения и некондиционных углей
энерготехнологическим комплексом

Днепропетровск – 2012

Продовження дод. Л

КОПІЯ

УДК 622.78-916

Рекомендации по эффективному использованию способов термической переработки отходов углеобогащения и некондиционных углей энерготехнологическим комплексом. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2012. – 14 с.

«Рекомендации...» разработаны Институтом геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

Документ содержит основные положения и особенности применения различных способов термической переработки углеотходов, рекомендации по оценке исходного сырья, технические требования к использованию способа термической переработки шламов и некондиционных углей, оценку эффективности предложенных рекомендаций.

«Рекомендации...» предназначены для инженерно-технических работников горной промышленности, научных сотрудников научно-исследовательских и учебных институтов, а также специалистов, занимающихся практикой переработки и утилизации отходов углеобогащения.

В разработке «Рекомендаций...» принимали участие:

Ст. науч. сотр., к. т. н.

Ст. науч. сотр., к. т. н.

Ст. науч. сотр., к. т. н.

Ст. науч. сотр., к. т. н.

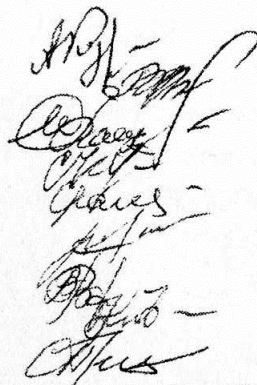
Ст. науч. сотр., к. т. н.

Науч. сотр.

Гл. констр.

Инж. 1 кат.

Инженер



А.Т. Курносов

В.Л. Приходченко

И.Н. Слащев

С.А. Курносов

Е.А. Слащева

В.Я. Осенний

В.С. Возиянов

Э.С. Ключев

С.Д. Приходченко

© Институт геотехнической механики
им. Н.С. Полякова НАН Украины, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Особенности способов термической переработки отходов углеобогащения и некондиционных углей	4
2. Рекомендации по эффективному использованию способов термической переработки шламов и некондиционных углей энерготехнологическим комплексом.....	8
3. Факторы экономической эффективности энергокомплекса.....	10
4. Ожидаемый экономический эффект от внедрения энергокомплекса по термической переработке шламов и некондиционных углей	11

Продовження дод. Л

КОПІЯ

13

$$З = C + E_n(K + K_c), \quad (6)$$

где $З$ - приведенные затраты, грн; C - себестоимость единицы продукции, грн; E_n - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (для новой техники $E_n=0,15$); K - удельные капитальные вложения в энергокомплекс, грн; K_c - капитальные вложения на монтаж (без учета стоимости оборудования) в расчете на объект в целом, грн.

При внедрении новой техники рассчитывается годовая прибыль Π , достигаемая в результате внедрения энергокомплекса (по сравнению со сметной стоимостью),

$$\Pi_t = (Ц_t - C_t)A_t, \quad (7)$$

где $Ц_t$ - стоимость единицы работ, выполняемых в t -м году, грн.; C_t - себестоимость единицы соответствующих работ, грн.

Срок окупаемости капитальных вложений, направляемых на приобретение нового оборудования, рассчитывается по формуле

$$T = \frac{K + K_c}{\Pi_t} \quad (8)$$

где T - срок окупаемости капитальных вложений, лет; Π - годовая прибыль от использования энергокомплекса, грн.

Эффективность будет обеспечена, если срок окупаемости $T_{ок} \leq 5-7$ лет, или коэффициент эффективности больше

$$E = \frac{1}{T_{ок}} \geq 0,14.$$

Параметр E является обобщенной характеристикой экономических критериев оценки способов переработки шламов и некондиционных углей.

Результаты расчета экономической эффективности приведены в табл. 4.

Таким образом, плановый расчетный экономический эффект от эксплуатации энергокомплекса составляет:

- в первый год

$$\mathcal{E}_{t1} = 133,98 + 540,00 + 244,20 + 13650,48 - 254,40 - 622,08 - 207,36 - 576,00 - 4860,00 - 900,00 - 2400,00 = 4748,82 \text{ тыс. грн./год};$$

- в последующие годы

$$\mathcal{E}_{tk} = 14568,66 - 1659,84 - 4860,00 = 8048,82 \text{ тыс. грн./год};$$

- приведенный к сроку эксплуатации по нормативному коэффициенту эффективности капитальных вложений

$$\mathcal{E} = 14568,66 - 1659,84 - 4860,00 - 0,15(2400,00 + 900,00) = 7553,82 \text{ тыс. грн./год};$$

ДОДАТОК М

Вихідний код основних модулів програмного комплексу

```

unit UChartManager;
interface
uses
  Chart, UTypes;
type
  TChartManager = class
    private
      FInnerOffset: integer;
      procedure SetInnerOffset(Value: integer);
    public
      property InnerOffset: integer read FInnerOffset write SetInnerOffset;
      constructor Create;
      procedure DrawDisplay(var Diagram: TChart; var
RecArray: TRecArray; Start, Finish: integer);
      procedure DrawFFT(var Diagram: TChart; var RecArray: TRecArray);
    end;
  implementation
uses
  Math, Graphics;

  constructor TChartManager.Create;
  begin
    inherited Create;
    FInnerOffset := 0;
  end;

  procedure TChartManager.DrawDisplay(var Diagram: TChart; var
RecArray: TRecArray; Start, Finish: integer);
  var
    RealStart, RealFinish: integer;
    i: integer;
  begin
    Diagram.Title.Text.Clear;
    Diagram.Title.Text.Add('Показания счетчиков');
    Diagram.Series[0].Clear;
    Diagram.Series[1].Clear;
    RealStart := Max(0, Start);
    RealStart := Min(RealStart, Length(RecArray.Sensors.N1));
    RealFinish := Max(0, Finish);
    RealFinish := Min(RealFinish, Length(RecArray.Sensors.N1));
    RealFinish := Max(RealStart, RealFinish);
  end;

```

```

    for i:=RealStart to RealFinish do
    begin
        Diagram.Series[0].AddY(RecArray.Sensors.N1[i],",clBlack);
        Diagram.Series[1].AddY(RecArray.Sensors.N2[i],",clBlack);
    end;
end;
procedure TChartManager.SetInnerOffset(Value:integer);
begin
    FInnerOffset:=Max(Value,0);
end;
procedure TChartManager.DrawFFT(var Diagram:TChart;var
RecArray:TRecArray);
var
    i:integer;
    n:integer;
begin
    Diagram.Title.Text.Clear;
    Diagram.Title.Text.Add('FFT');
    Diagram.Series[0].Clear;
    Diagram.Series[1].Clear;
    n:=Length(RecArray.Sensors.N1_FFT.Magnitude);
    n:=Round(n/2);
    for i:=1 to n do
    begin
        Diagram.Series[0].AddXY(RecArray.Sensors.N1_FFT.Frequency[i-
1],RecArray.Sensors.N1_FFT.Magnitude[i-1]);
        Diagram.Series[1].AddXY(RecArray.Sensors.N2_FFT.Frequency[i-
1],RecArray.Sensors.N2_FFT.Magnitude[i-1]);
    end;
    end;
end.

unit UCompareForm;
interface
uses
    Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
    Dialogs, StdCtrls;
type
    TCompareForm = class(TForm)
        btnOK: TButton;
        btnCancel: TButton;
        comboSign: TComboBox;
        lblSign: TLabel;
        procedure FormShow(Sender: TObject);
        procedure btnCancelClick(Sender: TObject);
    end;

```

```

    procedure btnOKClick(Sender: TObject);
    private
    public
    end;

implementation
{$R *.dfm}
uses
    DB, UTypes, UData, USignalProcessing, UIBase, UWinnerForm, UFunctions;
procedure TCompareForm.FormShow(Sender: TObject);
begin
    Left:=(Screen.Width div 2)-(Width div 2);
    Top:=(Screen.Height div 2)-(Height div 2);
end;
procedure TCompareForm.btnCancelClick(Sender: TObject);
begin
    Close;
end;
procedure TCompareForm.btnOKClick(Sender: TObject);
var
    ArrRecords:TArrRecords;
    SQLText:TStringList;
    i:integer;
    m,n:integer;
    ComparedValues:array [1..2] of TArrDouble;
    StrResult:string;
    WinnerInfo:array [1..2] of TWinnerInfo;
begin
    // 1 - Формируем список образцов
    SetLength(ArrRecords,0);
    SQLText:=TStringList.Create;
    SQLText.Clear;
    SQLText.Add('SELECT * FROM SAMPLES');

    if not IBManager.Exec(SQLText,etOpen) then
    begin
        MessageDlg('Ошибка обращения к базе'#13#10+IBManager.LastMessage,mtError,[mbOK],0);
        SQLText.Free;
        Exit;
    end;
    IBManager.Query.First;
    while not IBManager.Query.Eof do
    begin
        SetLength(ArrRecords,Length(ArrRecords)+1);

```

```

        ArrRecords[Length(ArrRecords)-
1].ID:=IBManager.SpaceIfNULL(IBManager.Query.FieldValues['ID'],ftInteger);
        ArrRecords[Length(ArrRecords)-
1].DtStr:=IBManager.SpaceIfNULL(IBManager.Query.FieldValues['TM'],ftString);
        ArrRecords[Length(ArrRecords)-
1].Sensors.Sign1:=IBManager.SpaceIfNULL(IBManager.Query.FieldValues['SIGN1'],
ftInteger);
        ArrRecords[Length(ArrRecords)-
1].Sensors.Sign2:=IBManager.SpaceIfNULL(IBManager.Query.FieldValues['SIGN2'],
ftInteger);
        ArrRecords[Length(ArrRecords)-
1].Sensors.Descr1:=IBManager.SpaceIfNULL(IBManager.Query.FieldValues['DESC
R1'],ftString);
        ArrRecords[Length(ArrRecords)-
1].Sensors.Descr2:=IBManager.SpaceIfNULL(IBManager.Query.FieldValues['DESC
R2'],ftString);
        SetLength(ArrRecords[Length(ArrRecords)-1].Sensors.N1_FFT.Frequency,0);
        SetLength(ArrRecords[Length(ArrRecords)-
1].Sensors.N1_FFT.Magnitude,0);
        SetLength(ArrRecords[Length(ArrRecords)-1].Sensors.N2_FFT.Frequency,0);
        SetLength(ArrRecords[Length(ArrRecords)-
1].Sensors.N2_FFT.Magnitude,0);
        IBManager.Query.Next;
    end;
    m:=Length(ArrRecords);
    for i:=1 to m do begin
        n:=0;
        SQLText.Clear;
        SQLText.Add('SELECT * FROM FFT');
        SQLText.Add('WHERE S_ID='+IntToStr(ArrRecords[i-1].ID));
        if not IBManager.Exec(SQLText,etOpen) then
            begin
                MessageDlg('Ошибка обращения к
базе'#13#10+IBManager.LastMessage,mtError,[mbOK],0);
                SQLText.Free;
                Exit;
            end;
        IBManager.Query.First;
        while not IBManager.Query.Eof do
            begin
                Inc(n);
                SetLength(ArrRecords[i-1].Sensors.N1_FFT.Frequency,n);
                SetLength(ArrRecords[i-1].Sensors.N1_FFT.Magnitude,n);
                SetLength(ArrRecords[i-1].Sensors.N2_FFT.Frequency,n);
                SetLength(ArrRecords[i-1].Sensors.N2_FFT.Magnitude,n);
            end;
        end;
    end;

```

```

        ArrRecords[i-1].Sensors.N1_FFT.Frequency[n-
1]:=IBManager.SpaceIfNULL(IBManager.Query.FieldValues['FREQ_1'],ftFloat);
        ArrRecords[i-1].Sensors.N1_FFT.Magnitude[n-
1]:=IBManager.SpaceIfNULL(IBManager.Query.FieldValues['MAGN_1'],ftFloat);
        ArrRecords[i-1].Sensors.N2_FFT.Frequency[n-
1]:=IBManager.SpaceIfNULL(IBManager.Query.FieldValues['FREQ_2'],ftFloat);
        ArrRecords[i-1].Sensors.N2_FFT.Magnitude[n-
1]:=IBManager.SpaceIfNULL(IBManager.Query.FieldValues['MAGN_2'],ftFloat);
        IBManager.Query.Next;
    end;
end;

// Начинаем сравнивать
SetLength(ComparedValues[1],m);
SetLength(ComparedValues[2],m);
SignalProcessing.FFTConvert(MainRecArray,ChartManager.InnerOffset,Chart
Manager.InnerOffset+CRegionOffset);
case comboSign.ItemIndex of
0:begin
    // Экспертная система

SignalProcessing.Compare(comboSign.ItemIndex,MainRecArray,StrResult,ExpertSyst
emFileName);

MessageDlg('Результат:'#13#10#13#10+StrResult,mtInformation,[mbOK],0);
    end;
1:begin
    // Кластеризация

SignalProcessing.Compare(comboSign.ItemIndex,MainRecArray,ArrRecords,StrResul
t);

MessageDlg('Результат:'#13#10#13#10+StrResult,mtInformation,[mbOK],0);
    end;
2,3:begin
    // Нейронная сеть Хопфилда
    // Нейронная сеть обратного распространения ошибки
    if Length(ArrRecords)<>0 then
        begin

SignalProcessing.Compare(comboSign.ItemIndex,MainRecArray,ArrRecords,1,Winne
rInfo[1]);
        WinnerForm.lblID1.Caption:=WinnerInfo[1].ID;
        WinnerForm.editTime1.Text:=WinnerInfo[1].Time;
        WinnerForm.editSign1.Text:=WinnerInfo[1].Sign;

```

```

WinnerForm.editDescr1.Text:=WinnerInfo[1].Descr;

SignalProcessing.Compare(comboSign.ItemIndex,MainRecArray,ArrRecords,2,Winne
rInfo[2]);
    WinnerForm.lblID2.Caption:=WinnerInfo[2].ID;
    WinnerForm.editTime2.Text:=WinnerInfo[2].Time;
    WinnerForm.editSign2.Text:=WinnerInfo[2].Sign;
    WinnerForm.editDescr2.Text:=WinnerInfo[2].Descr;
    WinnerForm.ShowModal;
end;
end
else
begin
    MessageDlg('Образцы отсутствуют в базе',mtInformation,[mbOK],0);
end;
end;
SQLText.Free;
end;
end.

unit UIBase;
interface
uses
    Classes, SysUtils, Variants, IBDatabase, DB, IBQuery, UTypes;
type
    TExecType=(etOpen,etExec);
type
    TIBManager=class
    private
        FIBDBase:TIBDatabase;
        FIBTransaction:TIBTransaction;
        FIBQuery:TIBQuery;
        FLastMessage:string;
        function GetConnected:boolean;
    public
        property LastMessage:string read FLastMessage;
        property Query:TIBQuery read FIBQuery;
        property Connected:boolean read GetConnected;
        constructor Create;
        destructor Destroy;override;
        function Connect:boolean;
        procedure CloseQuery;
        procedure CloseDatabase;
        function Exec(SQLText:TStrings;ExecType:TExecType):boolean;
        procedure SetParams(var Params:TIBParams);

```

```

        function RestoreTables:boolean;
        function
                                SaveNewSample(var
RecArray:TRecArray;Start,Finish:integer;Sign1,Sign2:integer;Descr1,Descr2:string):b
oolean;

        function GetMaxPK(TableName,PKName:string):integer;
        procedure DeleteAllItems(PK:integer);
        procedure DeleteItems(TableName,PKName:string;PK:integer);
        procedure DeleteSign(TableName,SignName:string;Sel:integer);
        function SpaceIfNULL(V:Variant;FT:TFieldType):Variant;
    end;
implementation
uses
    Math,UFunctions;
constructor TIBManager.Create;
begin
    inherited Create;
    FIBDBase:=TIBDatabase.Create(nil);
    FIBDBase.LoginPrompt:=false;
    FIBTransaction:=TIBTransaction.Create(nil);

    FIBQuery:=TIBQuery.Create(nil);
    FIBDBase.DefaultTransaction:=FIBTransaction;
    FIBTransaction.DefaultDatabase:=FIBDBase;
    FIBQuery.Database:=FIBDBase;
    FIBQuery.Transaction:=FIBTransaction;
    FLastMessage:="";
end;
destructor TIBManager.Destroy;
begin
    CloseDatabase;
    FIBDBase.Free;
    FIBTransaction.Free;
    TRY
        FIBQuery.Free;
    EXCEPT
    END;
    inherited Destroy;
end;
procedure TIBManager.CloseQuery;
begin
    if FIBQuery.Active then
        begin
            TRY
                FIBQuery.Close;
            EXCEPT

```

```

    END;
  end;
end;

```

```

procedure TIBManager.CloseDatabase;
begin
  CloseQuery;
  if FIBDBase.Connected then
    begin
      TRY
        FIBDBase.Connected:=false;
      EXCEPT
      END;
    end;
  end;
function TIBManager.Exec(SQLText:TStrings;ExecType:TExecType):boolean;
var
  i:integer;
begin
  Result:=false;
  FLastMessage:="";
  TRY
    CloseQuery;
    FIBQuery.SQL.Clear;
    for i:=1 to SQLText.Count do
      begin
        FIBQuery.SQL.Add(SQLText.Strings[i-1]);
      end;
    case ExecType of
      etOpen:begin
        FIBQuery.Open;
      end;
      etExec:begin
        FIBQuery.ExecSQL;
      end;
    end;
    Result:=true;
  EXCEPT
    on E:Exception do FLastMessage:=E.Message;
  END;
end;
procedure TIBManager.SetParams(var Params:TIBParams);
begin
  if Params.Server="" then
    begin

```

```

    FIBDBase.DatabaseName:=Params.Database;
end
else
begin
    FIBDBase.DatabaseName:=Params.Server+'.'+Params.Database;
end;
FIBDBase.Params.Clear;
if Params.User<>" then
begin
    FIBDBase.Params.Add('user_name='+Params.User);
end;
if Params.Password<>" then
begin
    FIBDBase.Params.Add('password='+Params.Password);
end;
end;

function TIBManager.Connect:boolean;
begin
    Result:=false;
    CloseQuery;
    CloseDatabase;
    FLastMessage:="";
    TRY
        FIBDBase.Connected:=true;
        Result:=true;
    EXCEPT
        on E:Exception do FLastMessage:=E.Message;
    END;
end;

function TIBManager.GetConnected:boolean;
begin
    Result:=FIBDBase.Connected;
end;

function TIBManager.RestoreTables:boolean;
var
    SQLText:TStringList;
begin
    Result:=false;
    SQLText:=TStringList.Create;
    if not FIBDBase.Connected then
    begin
        if not Connect then
        begin
            SQLText.Free;

```

```

    Exit;
end;
end;
// Проверяем и создаем базы
SQLText.Clear;
SQLText.Add('SELECT * FROM SAMPLES');
if not Exec(SQLText,etOpen) then
begin
    SQLText.Clear;
    SQLText.Add('CREATE TABLE SAMPLES');
    SQLText.Add('(ID int NOT NULL PRIMARY KEY,');
    SQLText.Add('SIGN1 int,');
    SQLText.Add('SIGN2 int,');
    SQLText.Add('DESCR1 varchar(250),');
    SQLText.Add('DESCR2 varchar(250),');
    SQLText.Add('TM varchar(8))');
    if not Exec(SQLText,etExec) then
    begin
        SQLText.Free;
        Exit;
    end;
end;
SQLText.Clear;
SQLText.Add('SELECT * FROM SENSORS');
if not Exec(SQLText,etOpen) then
begin
    SQLText.Clear;
    SQLText.Add('CREATE TABLE SENSORS');
    SQLText.Add('(ID int NOT NULL PRIMARY KEY,');
    SQLText.Add('S_ID int,');
    SQLText.Add('VALUE_1 float,');
    SQLText.Add('VALUE_2 float)');
    if not Exec(SQLText,etExec) then
    begin
        SQLText.Free;
        Exit;
    end;
end;
SQLText.Clear;
SQLText.Add('SELECT * FROM FFT');
if not Exec(SQLText,etOpen) then
begin
    SQLText.Clear;
    SQLText.Add('CREATE TABLE FFT');
    SQLText.Add('(ID int NOT NULL PRIMARY KEY,');

```

```

SQLText.Add('S_ID int,');
SQLText.Add('FREQ_1 float,');
SQLText.Add('MAGN_1 float,');
SQLText.Add('FREQ_2 float,');
SQLText.Add('MAGN_2 float');
if not Exec(SQLText,etExec) then
begin
    SQLText.Free;
    Exit;
end;
end;
SQLText.Free;
Result:=true;
end;
function TIBManager.SaveNewSample(var
RecArray:TRecArray;Start,Finish:integer;Sign1,Sign2:integer;Descr1,Descr2:string):b
oolean;
var
    NewPK:integer;
    SQLText:TStringList;
    i:integer;
    LinePK:integer;
    RealStart,RealFinish:integer;
begin
    Result:=false;
    NewPK:=GetMaxPK('SAMPLES','ID')+1;
    DeleteAllItems(NewPK);
    SQLText:=TStringList.Create;
    // Заголовок
    SQLText.Clear;
    SQLText.Add('INSERT INTO SAMPLES');
    SQLText.Add('(ID,SIGN1,SIGN2,DESCR1,DESCR2,TM)');
    SQLText.Add('VALUES');
    SQLText.Add('(' + IntToStr(NewPK) + ',
                                                    '+IntToStr(Sign1) + ',
'+IntToStr(Sign2) + ', "' + Descr1 + '"', "' + Descr2 + '"', '+"' + RecArray.DtStr + "' + ')');
    if not Exec(SQLText,etExec) then
begin
    DeleteAllItems(NewPK);
    SQLText.Free;
    Exit;
end;
    // Данные датчиков
    RealStart:=Max(0,Start);
    RealStart:=Min(RealStart,Length(RecArray.Sensors.N1));

```

```

RealFinish:=Max(0,Finish);
RealFinish:=Min(RealFinish,Length(RecArray.Sensors.N1));
RealFinish:=Max(RealStart,RealFinish);
LinePK:=GetMaxPK('SENSORS','ID')+1;
for i:=RealStart to RealFinish do
begin
  SQLText.Clear;
  SQLText.Add('INSERT INTO SENSORS');
  SQLText.Add('(ID,S_ID,VALUE_1,VALUE_2)');
  SQLText.Add('VALUES');
  SQLText.Add('(' + IntToStr(LinePK) + ', ');
  SQLText.Add(IntToStr(NewPK) + ', ');

  SQLText.Add('"' + DotFromComma(FloatToStr(RecArray.Sensors.N1[i])) + '"' + ', ');

  SQLText.Add('"' + DotFromComma(FloatToStr(RecArray.Sensors.N2[i])) + '"' + ')');
  if not Exec(SQLText,etExec) then
  begin
    DeleteAllItems(NewPK);
    SQLText.Free;
    Exit;
  end;
  Inc(LinePK);
end;
// Данные FFT
LinePK:=GetMaxPK('FFT','ID')+1;
for i:=1 to Length(RecArray.Sensors.N1_FFT.Frequency) do
begin
  SQLText.Clear;
  SQLText.Add('INSERT INTO FFT');
  SQLText.Add('(ID,S_ID,FREQ_1,MAGN_1,FREQ_2,MAGN_2)');
  SQLText.Add('VALUES');
  SQLText.Add('(' + IntToStr(LinePK) + ', ');
  SQLText.Add(IntToStr(NewPK) + ', ');

  SQLText.Add('"' + DotFromComma(FloatToStr(RecArray.Sensors.N1_FFT.Frequency[
i-1])) + '"' + ', ');

  SQLText.Add('"' + DotFromComma(FloatToStr(RecArray.Sensors.N1_FFT.Magnitude[
i-1])) + '"' + ', ');

  SQLText.Add('"' + DotFromComma(FloatToStr(RecArray.Sensors.N2_FFT.Frequency[
i-1])) + '"' + ', ');

```

```

SQLText.Add(''+DotFromComma(FloatToStr(RecArray.Sensors.N2_FFT.Magnitude[
i-1]))+''+')');
    if not Exec(SQLText,etExec) then
    begin
        DeleteAllItems(NewPK);
        SQLText.Free;
        Exit;
    end;
    Inc(LinePK);
end;
SQLText.Free;
Result:=true;
end;
function TIBManager.GetMaxPK(TableName,PKName:string):integer;
var
    SQLText:TStringList;
begin
    Result:=0;
    SQLText:=TStringList.Create;
    SQLText.Clear;
    SQLText.Add('SELECT MAX('+PKName+') AS PK FROM '+TableName);
    if Exec(SQLText,etOpen) then
    begin
        FIBQuery.First;
        if FIBQuery.FieldValues['PK']<>NULL then
        begin
            TRY
                Result:=FIBQuery.FieldValues['PK'];
            EXCEPT
            END;
        end;
    end;
    SQLText.Free;
end;
procedure TIBManager.DeleteAllItems(PK:integer);
begin
    DeleteItems('SAMPLES','ID',PK);
    DeleteItems('SENSORS','S_ID',PK);
    DeleteItems('FFT','S_ID',PK);
end;
procedure TIBManager.DeleteItems(TableName,PKName:string;PK:integer);
var
    SQLText:TStringList;
begin

```

```

SQLText:=TStringList.Create;
SQLText.Clear;
SQLText.Add('DELETE FROM '+TableName);
SQLText.Add('WHERE '+PKName+'='+IntToStr(PK));
Exec(SQLText,etExec);
SQLText.Free;
end;
function TIBManager.SpaceIfNULL(V:Variant;FT:TFieldType):Variant;
begin
  Result:="";
  if V=NULL then
    begin
      if FT=ftInteger then
        begin
          Result:=0;
          Exit;
        end;
      if FT=ftFloat then
        begin
          Result:=0;
          Exit;
        end;
      if FT=ftString then
        begin
          Result:="";
          Exit;
        end;
      end
    end
  else
    begin
      Result:=V;
    end;
  end;
end;
procedure TIBManager.DeleteSign(TableName,SignName:string;Sel:integer);
var
  SQLText:TStringList;
begin
  SQLText:=TStringList.Create;
  SQLText.Clear;
  SQLText.Add('UPDATE '+TableName);
  SQLText.Add('SET');
  SQLText.Add(SignName+'='+SignName+'-1');
  SQLText.Add('WHERE '+SignName+'>='+IntToStr(Sel));
  Exec(SQLText,etExec);
  SQLText.Free;
end;

```

```
end;
end.
```

```
unit UMainForm;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, Menus, ExtCtrls, DB, IBCustomDataSet, IBQuery, IBDatabase,
  TeeProcs, TeEngine, Chart, ComCtrls, Series, Buttons, StdCtrls, Spin;
type
  TMainForm = class(TForm)
    MainMenu: TMainMenu;
    N1: TMenuItem;
    N2: TMenuItem;
    N3: TMenuItem;
    N4: TMenuItem;
    Panel: TPanel;
    Pages: TPageControl;
    TabDisplay: TTabSheet;
    LeftPanel: TPanel;
    Diagram: TChart;
    Series2: TFastLineSeries;
    btnOpenFile: TSpeedButton;
    OD: TOpenDialog;
    SD: TSaveDialog;
    TabFFT: TTabSheet;
    BottomPanel: TPanel;
    btnPrev: TSpeedButton;
    btnNext: TSpeedButton;
    btnCompare: TSpeedButton;
    Series1: TFastLineSeries;
    btnSaveSample: TSpeedButton;
    btnDelFromBase: TSpeedButton;
    N5: TMenuItem;
    SpinEdit: TSpinEdit;
    procedure N2Click(Sender: TObject);
    procedure N4Click(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure FormCloseQuery(Sender: TObject; var CanClose: Boolean);
    procedure btnOpenFileClick(Sender: TObject);
    procedure PagesChange(Sender: TObject);
    procedure btnPrevClick(Sender: TObject);
    procedure btnNextClick(Sender: TObject);
    procedure btnSaveSampleClick(Sender: TObject);
    procedure btnDelFromBaseClick(Sender: TObject);
```

```

    procedure btnCompareClick(Sender: TObject);
    procedure N5Click(Sender: TObject);
private
public
    SignalLoaded:boolean;
    procedure DrawChart;
end;
var
    MainForm: TMainForm;
implementation
{$R *.dfm}
uses
    Math,StrUtils,UConnectionForm,UTypes,UData,UIBase,UFileManager,
    UChartManager,USignalProcessing,USaveSampleForm,UDeleteForm,
    UCompareForm,UFunctions,USignTypesForm;
procedure TMainForm.N2Click(Sender: TObject);
begin
    Close;
end;
procedure TMainForm.N4Click(Sender: TObject);
begin
    ConnectionForm.ShowModal;
    if ConnectionForm.SuccessEnd then
    begin
        IBManager.CloseDatabase;
        IBParams.Server:=ConnectionForm.editServer.Text;
        IBParams.Database:=ConnectionForm.editDatabase.Text;
        IBParams.User:=ConnectionForm.editUser.Text;
        IBParams.Password:=ConnectionForm.editPassword.Text;
        IBManager.SetParams(IBParams);
        IBManager.Connect;
    end;
end;

procedure TMainForm.FormCreate(Sender: TObject);
var
    s:string;
begin
    SignalLoaded:=false;
    SetLength(SignTypes,0);
    // Ищем имя программы
    s:=ExtractFileExt(ParamStr(0));
    if s="" then
    begin
        s:=ExtractFileName(ParamStr(0));
    end;
end;

```

```

end
else
begin
s:=ExtractFileName(ParamStr(0));
s:=LeftStr(s,Length(s)-Length(ExtractFileExt(ParamStr(0))));
end;
ParamFileName:=ExtractFilePath(ParamStr(0))+s+'.dat';
SignFileName:=ExtractFilePath(ParamStr(0))+s+'.sgn';
ExpertSystemFileName:=ExtractFilePath(ParamStr(0))+s+'.esf';
IBParams.FilesDir:=ExtractFilePath(ParamStr(0));
FileManager.LoadParams(ParamFileName,IBParams);
FileManager.LoadSignTypes(SignFileName,SignTypes);
TRY
OD.InitialDir:=IBParams.FilesDir;
EXCEPT
END;
TRY
SD.InitialDir:=IBParams.FilesDir;
EXCEPT
END;
IBManager.CloseDatabase;
IBManager.SetParams(IBParams);
IBManager.Connect;
if not IBManager.RestoreTables then
begin
MessageDlg('Ошибка                                     базы
данных'#13#10+IBManager.LastMessage,mtWarning,[mbOK],0);
end;
end;
procedure TMainForm.FormCloseQuery(Sender: TObject; var CanClose:
Boolean);
begin
FileManager.SaveParams(ParamFileName,IBParams);
FileManager.SaveSignTypes(SignFileName,SignTypes);
end;
procedure TMainForm.btnOpenFileClick(Sender: TObject);
begin
if not OD.Execute then
begin
Exit;
end;
IBParams.FilesDir:=ExtractFilePath(OD.FileName);
if RightStr(IBParams.FilesDir,1)<>'\' then
begin
IBParams.FilesDir:=IBParams.FilesDir+'\'';

```

```

end;
if not FileManager.LoadFileToArray(OD.FileName,MainRecArray) then
begin
  MessageDlg('Ошибка открытия
файла'#13#10+OD.FileName+'#13#10+FileManager.LastMessage,mtError,[mbOK],0)
;
  Exit;
end;
ChartManager.InnerOffset:=0;
SignalLoaded:=true;
Self.Caption:='Анализ сигнала: '+ExtractFileName(OD.FileName);
DrawChart;
end;
procedure TMainForm.PagesChange(Sender: TObject);
begin
  Diagram.Parent:=Pages.ActivePage;
  DrawChart;
end;
procedure TMainForm.DrawChart;
begin
  if not SignalLoaded then
  begin
    Exit;
  end;
  Diagram.Enabled:=true;
  btnPrev.Enabled:=not (ChartManager.InnerOffset=0);
  btnNext.Enabled:=not
((ChartManager.InnerOffset+CRegionOffset)>=Length(MainRecArray.Sensors.N1));
  btnCompare.Enabled:=true;
  btnSaveSample.Enabled:=true;
  if Pages.ActivePage=TabDisplay then
  begin

ChartManager.DrawDisplay(Diagram,MainRecArray,ChartManager.InnerOffset,Chart
Manager.InnerOffset+CRegionOffset);
    Exit;
  end;
  if Pages.ActivePage=TabFFT then
  begin
SignalProcessing.FFTConvert(MainRecArray,ChartManager.InnerOffset,ChartManage
r.InnerOffset+CRegionOffset);
    ChartManager.DrawFFT(Diagram,MainRecArray);
    Exit;
  end;
end;
end;

```

```

procedure TMainForm.btnPrevClick(Sender: TObject);
begin
  ChartManager.InnerOffset:=ChartManager.InnerOffset-SpinEdit.Value;
  DrawChart;
end;
procedure TMainForm.btnNextClick(Sender: TObject);
begin
  ChartManager.InnerOffset:=ChartManager.InnerOffset+SpinEdit.Value;
  if
    (ChartManager.InnerOffset+CRegionOffset)>Length(MainRecArray.Sensors.N1) then
  begin
    ChartManager.InnerOffset:=Max(0,Length(MainRecArray.Sensors.N1)-
CRegionOffset);
  end;
  DrawChart;
end;
procedure TMainForm.btnSaveSampleClick(Sender: TObject);
var
  SaveSampleForm:TSaveSampleForm;
begin
  SaveSampleForm:=TSaveSampleForm.Create(nil);
  SaveSampleForm.lblTimeInfo.Caption:=MainRecArray.DtStr;
  SaveSampleForm.ShowModal;
  if SaveSampleForm.SuccessEnd then
  begin
    SignalProcessing.FFTConvert(MainRecArray,ChartManager.InnerOffset,ChartManager.InnerOffset+CRegionOffset);
    if not
      IBManager.SaveNewSample(MainRecArray,ChartManager.InnerOffset,ChartManager.InnerOffset+CRegionOffset,SaveSampleForm.comboSign1.ItemIndex,SaveSampleForm.comboSign2.ItemIndex,SaveSampleForm.editDescr1.Text,SaveSampleForm.editDescr2.Text) then
    begin
      MessageDlg('Не удалось сохранить образец'#13#10+IBManager.LastMessage,mtError,[mbOK],0);
    end;
  end;
  SaveSampleForm.Free;
end;
procedure TMainForm.btnDelFromBaseClick(Sender: TObject);
var
  DeleteForm:TDeleteForm;
  SQLText:TStringList;
begin
  DeleteForm:=TDeleteForm.Create(nil);

```

```

SQLText:=TStringList.Create;
SQLText.Clear;
SQLText.Add('SELECT * FROM SAMPLES');
if IBManager.Exec(SQLText,etOpen) then
begin
    IBManager.Query.First;
    while not IBManager.Query.Eof do
    begin
DeleteForm.View.AddItem(IBManager.SpaceIfNULL(IBManager.Query.FieldValues[
'ID'],ftInteger),nil);
        DeleteForm.View.Items[DeleteForm.View.Items.Count-
1].SubItems.Add(IBManager.SpaceIfNULL(IBManager.Query.FieldValues['TM'],ftStr
ing));
        DeleteForm.View.Items[DeleteForm.View.Items.Count-
1].SubItems.Add(GetSign(IBManager.SpaceIfNULL(IBManager.Query.FieldValues['
SIGN1'],ftInteger)));
        DeleteForm.View.Items[DeleteForm.View.Items.Count-
1].SubItems.Add(GetSign(IBManager.SpaceIfNULL(IBManager.Query.FieldValues['
SIGN2'],ftInteger)));
        DeleteForm.View.Items[DeleteForm.View.Items.Count-
1].SubItems.Add(IBManager.SpaceIfNULL(IBManager.Query.FieldValues['DESCR1'
],ftString));
        DeleteForm.View.Items[DeleteForm.View.Items.Count-
1].SubItems.Add(IBManager.SpaceIfNULL(IBManager.Query.FieldValues['DESCR1'
],ftString));
        IBManager.Query.Next;
    end;
end;
DeleteForm.ShowModal;
if DeleteForm.SuccessEnd then
begin
    IBManager.DeleteAllItems(DeleteForm.PK);
end;
DeleteForm.Free;
end;
procedure TMainForm.btnCompareClick(Sender: TObject);
var
    CompareForm:TCompareForm;
begin
    CompareForm:=TCompareForm.Create(nil);
    CompareForm.ShowModal;
    CompareForm.Free;
end;

```

```

procedure TMainForm.N5Click(Sender: TObject);
begin
    SignTypesForm.ShowModal;
end;
end.

unit UMBackSpread;

interface
uses
    UTypes;
procedure Compare(var MainRec:TRecArray;var
ArrRecords:TArrRecords;SNum:integer;var WI:TWinnerInfo);
implementation
uses
    SysUtils, UData, NeuralBaseComp, NeuralBaseTypes;
procedure ConvertToVFloat(Source:TFFT;var Dest:TVectorFloat);
var
    i,l:integer;
begin
    l:=Length(Source.Magnitude) div 2;
    SetLength(Dest,l);
    for i:=1 to l do
        begin
            Dest[i-1]:=Source.Magnitude[i-1];
        end;
    end;
procedure Compare(var MainRec:TRecArray;var
ArrRecords:TArrRecords;SNum:integer;var WI:TWinnerInfo);
var
    NeuralNetBP:TNeuralNetBP;
    FFT:TFFT;
    xInputVector,xOutputVector,M:TVectorFloat;
    i,k:integer;
begin
    NeuralNetBP:=TNeuralNetBP.Create(nil);
    NeuralNetBP.Alpha:=1;
    NeuralNetBP.AutoInit:=true;
    NeuralNetBP.ContinueTeach:=false;
    NeuralNetBP.Epoch:=true;
    NeuralNetBP.EpochCount:=1000;
    NeuralNetBP.Momentum:=0.9;
    NeuralNetBP.PatternCount:=0;
    NeuralNetBP.TeachRate:=0.1;
    NeuralNetBP.ResetLayers;

```

```

k:=100;
case SNum of
  1:begin
    k:=Length(MainRec.Sensors.N1_FFT.Magnitude) div 2;
  end;
  2:begin
    k:=Length(MainRec.Sensors.N2_FFT.Magnitude) div 2;
  end;
end;
NeuralNetBP.AddLayer(k);
NeuralNetBP.AddLayer(k);
NeuralNetBP.AddLayer(1);

//NeuralNetBP.Init;
// Обучение
NeuralNetBP.ResetPatterns;
for i:=1 to Length(ArrRecords) do
begin
  case SNum of
    1:begin
      FFT:=ArrRecords[i-1].Sensors.N1_FFT;
    end;
    2:begin
      FFT:=ArrRecords[i-1].Sensors.N2_FFT;
    end;
  end;
  end;
  SetLength(xOutputVector,1);
  ConvertToVFloat(FFT,xInputVector);
  xOutputVector[0]:=i-1;
  NeuralNetBP.AddPattern(xInputVector,xOutputVector);
end;
// Возврат результата
case SNum of
  1:begin
    ConvertToVFloat(MainRec.Sensors.N1_FFT,M);
  end;
  2:begin
    ConvertToVFloat(MainRec.Sensors.N2_FFT,M);
  end;
end;
NeuralNetBP.EpochCount:=1000;
NeuralNetBP.TeachOffLine;

NeuralNetBP.Compute(M);
k:=Round(NeuralNetBP.Output[0]);

```

```

    WI.ID:=IntToStr(ArrRecords[k].ID);
    WI.Time:=ArrRecords[k].DtStr;
    case SNum of
    1:begin
        WI.Sign:=SignTypes[ArrRecords[k].Sensors.Sign1];
        WI.Descr:=ArrRecords[k].Sensors.Descr1;
    end;
    2:begin
        WI.Sign:=SignTypes[ArrRecords[k].Sensors.Sign2];
        WI.Descr:=ArrRecords[k].Sensors.Descr2;
    end;
    end;
    NeuralNetBP.Free;
end;
end.

unit UClusterisation;
interface
uses
    UTypes;
    procedure Compare(var MainRec:TRecArray;var ArrRecords:TArrRecords;var
StrResult:string);
implementation
uses
    SysUtils,Types,UFunctions,UData;

type
    TCluster=record
        Number:integer;
        Average:Double;
        Lengths:TArrDouble;
    end;
    TClusters=array of TCluster;
    procedure Compare(var MainRec:TRecArray;var ArrRecords:TArrRecords;var
StrResult:string);
    var
        i,j,k,l,n,m:integer;
        Sensor_1:TClusters;
        Sensor_2:TClusters;
        D:Double;
        M1,M2:Double;
    begin
        StrResult:="";
        if Length(ArrRecords)=0 then
            begin

```

```

    StrResult:='Нет образцов для сравнения.';
    Exit;
end;
SetLength(Sensor_1,Length(SignTypes));
SetLength(Sensor_2,Length(SignTypes));
for i:=1 to Length(SignTypes) do
begin
    SetLength(Sensor_1[i-1].Lengths,Length(ArrRecords));
    SetLength(Sensor_2[i-1].Lengths,Length(ArrRecords));
end;
for i:=1 to Length(ArrRecords) do
begin
    n:=ArrRecords[i-1].Sensors.Sign1;
    m:=ArrRecords[i-1].Sensors.Sign2;
    Sensor_1[n].Lengths[i-1]:=0;
    Sensor_2[m].Lengths[i-1]:=0;
    for j:=1 to Length(MainRec.Sensors.N1_FFT.Magnitude) do
    begin
        D:=MainRec.Sensors.N1_FFT.Magnitude[j-1]-ArrRecords[i-1].Sensors.N1_FFT.Magnitude[j-1];
        Sensor_1[n].Lengths[i-1]:=Sensor_1[n].Lengths[i-1]+D*D;
        D:=MainRec.Sensors.N2_FFT.Magnitude[j-1]-ArrRecords[i-1].Sensors.N2_FFT.Magnitude[j-1];
        Sensor_2[m].Lengths[i-1]:=Sensor_2[m].Lengths[i-1]+D*D;
    end;
end;
for i:=1 to Length(SignTypes) do
begin
    Sensor_1[i-1].Average:=0;
    Sensor_2[i-1].Average:=0;
    for j:=1 to Length(Sensor_1[i-1].Lengths) do
    begin
        Sensor_1[i-1].Average:=Sensor_1[i-1].Average+Sensor_1[i-1].Lengths[j-1];
        Sensor_2[i-1].Average:=Sensor_2[i-1].Average+Sensor_2[i-1].Lengths[j-1];
    end;
    Sensor_1[i-1].Average:=sqrt(Sensor_1[i-1].Average);
    Sensor_2[i-1].Average:=sqrt(Sensor_2[i-1].Average);
end;
M1:=0;
M2:=0;
k:=0;
l:=0;

```

```

for i:=1 to Length(SignTypes) do
begin
if M1<Sensor_1[i-1].Average then
begin
M1:=Sensor_1[i-1].Average;
k:=i-1;
end;
if M2<Sensor_2[i-1].Average then
begin
M2:=Sensor_2[i-1].Average;
l:=i-1;
end;
end;
for i:=1 to Length(SignTypes) do
begin
if M1>Sensor_1[i-1].Average then
begin
M1:=Sensor_1[i-1].Average;
k:=i-1;
end;
if M2>Sensor_2[i-1].Average then
begin
M2:=Sensor_2[i-1].Average;
l:=i-1;
end;
end;
end;
StrResult:='Состояние датчика №1: '+SignTypes[k];
StrResult:=StrResult+#13#10;
StrResult:=StrResult+'Состояние датчика №2: '+SignTypes[l];
end;
end.

```

```

unit UMExpertSystem;
interface
uses
  UTypes;
procedure Compare(var MainRec:TRecArray;var
StrResult:string;FileName:string);
implementation
uses
  Dialogs,SysUtils,Types,UFunctions;
type
  TSign=(sEq,sLess,sLessEq,sGr,sGrEq);
  TCond=record
    Letter:char;

```

```

    Sign:TSign;
    Value:Double;
    Done:boolean;
end;
TConds=array of TCond;
TUnit=record
    Conds:TConds;
    Done:boolean;
end;
TUnits=array of TUnit;
TLine=record
    Units:TUnits;
    Done:boolean;
end;
TLines=array of TLine;
TState=record
    Lines:TLines;
    Done:boolean;
    Name:string;
end;
TStates=array of TState;
TSensor=record
    States:TStates;
    Done:boolean;
end;
var
    Sensors:array [1..2] of TSensor;
    DefState:string;
const
    Digs='0123456789.';
type
    TCurStep=(csLetter,csSign,csValue);
function          Reload(var          CurStep:TCurStep;var
st:string;i,lState,lLine,lUnit,lCond:integer):boolean;
begin
    Result:=false;
    if CurStep=csSign then
    begin
        Exit;
    end;
    if st<>" then
    begin
        if CurStep<>csValue then
        begin
            st:=";

```

```

        CurStep:=csLetter;
        Result:=true;
        Exit;
    end;
    if st[1]='.' then
    begin
        st:='.'+st;
    end;
    TRY

Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units[lUnit].Conds[lCond].Value:=StrToFloat(st
);
        EXCEPT
        TRY
Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units[lUnit].Conds[lCond].Value:=StrToFloat(C
ommaFromDot(st));
        EXCEPT
            Exit;
        END;
    END;
end;
st:="";
CurStep:=csLetter;
Result:=true;
end;
function AddLine(s:string):boolean;
var
    i,j:integer;
    lState,lLine,lUnit,lCond:integer;
    ch:char;
    st:string;
    CurStep:TCurStep;
    bUnit:boolean;
begin
    Result:=false;
    for i:=1 to 2 do
    begin
        lState:=Length(Sensors[i].States)-1;

        lLine:=Length(Sensors[i].States[lState].Lines);
        SetLength(Sensors[i].States[lState].Lines,lLine+1);
        Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Done:=false;

        lUnit:=0;
        SetLength(Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units,0);

```

```

bUnit:=true;
lCond:=0;
st:="";
CurStep:=csLetter;
for j:=1 to Length(s) do
begin
ch:=UpperCase(s)[j];
case ch of
'F','M':begin
if not Reload(CurStep,st,i,lState,lLine,lUnit,lCond) then
begin
Exit;
end;
if bUnit then
begin
bUnit:=false;
lUnit:=Length(Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units);
SetLength(Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units,lUnit+1);
Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units[lUnit].Done:=false;
lCond:=0;

SetLength(Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units[lUnit].Conds,1);
end
else
begin

lCond:=Length(Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units[lUnit].Conds);

SetLength(Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units[lUnit].Conds,lCond+1);
end;

Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units[lUnit].Conds[lCond].Letter:=ch;

Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units[lUnit].Conds[lCond].Done:=false;

Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units[lUnit].Conds[lCond].Value:=0;

Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units[lUnit].Conds[lCond].Sign:=sEq;
end;
'<','>','=':begin
if CurStep=csValue then
begin
Exit;
end;
if CurStep=csLetter then

```

```

        begin
            CurStep:=csSign;
            st:="";
            end;
            st:=st+ch;
        end;
    ':'begin
        if not Reload(CurStep,st,i,lState,lLine,lUnit,lCond) then
            begin
                Exit;
            end;
        end;
    ':'begin
        bUnit:=true;
        if not Reload(CurStep,st,i,lState,lLine,lUnit,lCond) then
            begin
                Exit;
            end;
        end;
    else
        begin
            if Pos(ch,Digs)<>0 then
                begin
                    if CurStep=csLetter then
                        begin
                            Exit;
                        end;
                    if CurStep=csSign then
                        begin
                            if (st<>'=') and (st<>'<') and (st<>'>') and (st<>'<=') and (st<>'>=') then
                                begin
                                    Exit;
                                end;
                            if st='=' then
                                begin

```

Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units[lUnit].Conds[lCond].Sign:=sEq;

```

                        end;
                    if st='<' then
                        begin

```

Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units[lUnit].Conds[lCond].Sign:=sLess;

```

                        end;
                    if st='>' then
                        begin

```

```

Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units[lUnit].Conds[lCond].Sign:=sGr;
    end;
    if st='<=' then
        begin

```

```

Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units[lUnit].Conds[lCond].Sign:=sLessEq;
    end;
  if st='>=' then
    begin

```

```
Sensors[i].States[lState].Lines[lLine].Units[lUnit].Conds[lCond].Sign:=sGrEq;
    end;
    CurStep:=csValue;
    st:="";
    end;
    st:=st+ch;
end
else
begin
Exit;
end;
end;
end;// case
end;// for string
if not Reload(CurStep,st,i,lState,lLine,lUnit,lCond) then
begin
Exit;
end;
end;// for 1..2
Result:=true;
end;
```

```
function Load(FileName:string;var Error:string):boolean;
var
    f:System.Text;
    s:string;
    ch:char;
    bReadCondition:boolean;
    i:integer;
begin
    Result:=false;
    TRY
        bReadCondition:=false;
        AssignFile(f,FileName);
        Reset(f);
```

```

i:=0;
while not EoF(f) do
begin
  ReadLn(f,s);
  Inc(i);
  s:=Trim(s);
  if s="" then
  begin
    Continue;
  end;
  ch:=s[1];
  if ch in ['!','#','$','/'] then
  begin
    s:=Copy(s,2,Length(s));
  end
else
begin
  Continue;
end;
s:=Trim(s);
if s="" then
begin
  Continue;
end;
case ch of
  '/':begin
    Continue;
  end;
  '!':begin
    DefState:=s;
    bReadCondition:=false;
  end;
  '#':begin
    bReadCondition:=true;
    SetLength(Sensors[1].States,Length(Sensors[1].States)+1);
    SetLength(Sensors[2].States,Length(Sensors[2].States)+1);

    Sensors[1].States[Length(Sensors[1].States)-1].Name:=s;
    Sensors[1].States[Length(Sensors[1].States)-1].Done:=false;
    SetLength(Sensors[1].States[Length(Sensors[1].States)-1].Lines,0);
    Sensors[2].States[Length(Sensors[2].States)-1].Name:=s;
    Sensors[2].States[Length(Sensors[2].States)-1].Done:=false;
    SetLength(Sensors[2].States[Length(Sensors[2].States)-1].Lines,0);
  end;
  '$':begin

```

```

        if not bReadCondition then
        begin
            Continue;
        end;
        if not AddLine(s) then
        begin
            Error:='Ошибка синтаксиса файла экспертной системы (строка
'+IntToStr(i)+')'#13#10+FileName;
            TRY
                CloseFile(f);
            EXCEPT
            END;
            Exit;
        end;
    end;
end;
end;
Result:=true;
EXCEPT
on E:Exception do
begin
    Error:='Ошибка чтения файла '#13#10+FileName+#13#10+E.Message;
    end;
END;
TRY
    CloseFile(f);
EXCEPT
END;
end;
procedure Compare(var MainRec:TRecArray;var
StrResult:string;FileName:string);
var
    i,j,l,k,m,n:integer;
    FFT:TFFT;
    R:array [1..2] of string;
    sState,SLine:string;
begin
    // Инициализация
    DefState:="";
    SetLength(Sensors[1].States,0);
    SetLength(Sensors[2].States,0);
    Sensors[1].Done:=false;
    Sensors[2].Done:=false;
    // Загрузка файла
    if not Load(FileName,StrResult) then

```

```

begin
  Exit;
end;

// Проходим по циклам
for i:=1 to 2 do
begin
  case i of
    1:begin
      FFT:=MainRec.Sensors.N1_FFT;
    end;
    2:begin
      FFT:=MainRec.Sensors.N2_FFT;
    end;
  end;
  R[i]:=DefState;
  for j:=1 to Length(Sensors[i].States) do
  begin
    if Sensors[i].States[j-1].Done then
    begin
      Continue;
    end;
    for l:=1 to Length(Sensors[i].States[j-1].Lines) do
    begin
      if Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Done then
      begin
        Continue;
      end;
      for k:=1 to Length(Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units) do
      begin
        if Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Done then
        begin
          Continue;
        end;
      end;
    end;
  end;

  // Идем по частотам
  for m:=1 to Length(FFT.Frequency) do
  begin
    // считаем условия
    for n:=1 to Length(Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds) do
    begin
      Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds[n-1].Done:=false;
      case Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds[n-1].Letter of
        'F':begin
          case Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds[n-1].Sign of

```

```

        sEq:begin
            if FFT.Frequency[m-1]=Sensors[i].States[j-1].Lines[l-
1].Units[k-1].Conds[n-1].Value then
                begin
                    Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds[n-
1].Done:=true;
                end;
            end;
        sLess:begin
            if FFT.Frequency[m-1]<Sensors[i].States[j-1].Lines[l-
1].Units[k-1].Conds[n-1].Value then
                begin
                    Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds[n-
1].Done:=true;
                end;
            end;
        sGr:begin
            if FFT.Frequency[m-1]>Sensors[i].States[j-1].Lines[l-
1].Units[k-1].Conds[n-1].Value then
                begin
                    Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds[n-
1].Done:=true;
                end;
            end;
        sLessEq:begin
            if FFT.Frequency[m-1]<=Sensors[i].States[j-1].Lines[l-
1].Units[k-1].Conds[n-1].Value then
                begin
                    Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds[n-
1].Done:=true;
                end;
            end;
        sGrEq:begin
            if FFT.Frequency[m-1]>=Sensors[i].States[j-1].Lines[l-
1].Units[k-1].Conds[n-1].Value then
                begin
                    Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds[n-
1].Done:=true;
                end;
            end;
        end; // case знак
    end;
    'M':begin
        case Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds[n-1].Sign of
            sEq:begin

```

```

        if FFT.Magnitude[m-1]=Sensors[i].States[j-1].Lines[l-
1].Units[k-1].Conds[n-1].Value then
            begin
                Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds[n-
1].Done:=true;
            end;
        end;
        sLess:begin
            if FFT.Magnitude[m-1]<Sensors[i].States[j-1].Lines[l-
1].Units[k-1].Conds[n-1].Value then
                begin
                    Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds[n-
1].Done:=true;
                end;
            end;
        sGr:begin
            if FFT.Magnitude[m-1]>Sensors[i].States[j-1].Lines[l-
1].Units[k-1].Conds[n-1].Value then
                begin
                    Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds[n-
1].Done:=true;
                end;
            end;
        sLessEq:begin
            if FFT.Magnitude[m-1]<=Sensors[i].States[j-1].Lines[l-
1].Units[k-1].Conds[n-1].Value then
                begin
                    Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds[n-
1].Done:=true;
                end;
            end;
        sGrEq:begin
            if FFT.Magnitude[m-1]>=Sensors[i].States[j-1].Lines[l-
1].Units[k-1].Conds[n-1].Value then
                begin
                    Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds[n-
1].Done:=true;
                end;
            end;
        end; // case знак
    end;
end; // case F/M
end; // for n считаем Conds
if Length(Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds)>0 then
    begin

```

```

        Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Done:=true;
    end;
    // Считаем Done Unit-a
    for n:=1 to Length(Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds) do
    begin
        Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Done:=Sensors[i].States[j-
1].Lines[l-1].Units[k-1].Done and Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Conds[n-
1].Done;
        end;
        if Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Done then
        begin
            Break;
        end;
    end; // for m - частоты
    end; // for k Units
    if Length(Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units)>0 then
    begin
        Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Done:=true;
    end;
    // Считаем Done Line-a
    for k:=1 to Length(Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units) do
    begin
        Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Done:=Sensors[i].States[j-1].Lines[l-
1].Done and Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Units[k-1].Done;
    end;
    end; // for l Lines
    // Считаем Done State-a
    for l:=1 to Length(Sensors[i].States[j-1].Lines) do
    begin
        Sensors[i].States[j-1].Done:=Sensors[i].States[j-1].Done
        Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Done;
    end;
    end; // for j Sensors
    // Считаем Done Sensor-a
    for j:=1 to Length(Sensors[i].States) do
    begin
        Sensors[i].Done:=Sensors[i].Done or Sensors[i].States[j-1].Done;
    end;
    end; // for i
    // Пишем результат
    StrResult:="";
    for i:=1 to 2 do
    begin
        if i>1 then
        begin

```

```

    StrResult:=StrResult+#13#10;
end;
StrResult:=StrResult+'Состояние датчика №:'+IntToStr(i)+' ';
sState:="";
SLine:="";
if Sensors[i].Done then
begin
for j:=1 to Length(Sensors[i].States) do
begin
if sState<>" then
begin
Break;
end;
if Sensors[i].States[j-1].Done then
begin
sState:=Sensors[i].States[j-1].Name;
end;
for l:=1 to Length(Sensors[i].States[j-1].Lines) do
begin
if Sensors[i].States[j-1].Lines[l-1].Done then
begin
if sLine<>" then
begin
sLine:=sLine+'+';
end;
sLine:=sLine+IntToStr(l);
end;
end;
end;
R[i]:=sState+' (условия '+sLine+')';
end;
StrResult:=StrResult+R[i];
end;
end;

```

end.

```

unit UMHopfield;
interface
uses
    UTypes;
procedure Compare(var MainRec:TRecArray;var
ArrRecords:TArrRecords;SNum:integer;var WI:TWinnerInfo);
implementation
uses

```

SysUtils,Math,Graphics,Types,UData;

type

THopfVector=packed array of byte;

THopfVectors=packed array of THopfVector;

TWeight=packed array of packed array of byte;

procedure ConvertArrayToImage(var Arr:TFFT;var BMP:TBitmap);

var

Width:integer;

x,y,d:integer;

P:PByteArray;

MMax,MMin:Double;

begin

Width:=16;

while Width<(Length(Arr.Frequency) div 2) do

begin

Width:=Width*2;

end;

BMP:=TBitmap.Create;

BMP.PixelFormat:=pf8bit;

BMP.Width:=Width;

BMP.Height:=Width;

MMin:=Arr.Magnitude[0];

MMax:=Arr.Magnitude[0];

for x:=1 to Length(Arr.Magnitude) do

begin

if MMin>Arr.Magnitude[x-1] then

begin

MMin:=Arr.Magnitude[x-1];

end;

if MMax<Arr.Magnitude[x-1] then

begin

MMax:=Arr.Magnitude[x-1];

end;

end;

for y:=1 to Width do

begin

P:=BMP.ScanLine[y-1];

for x:=1 to Width do

begin

if (y>Length(Arr.Magnitude)) or (x>Length(Arr.Magnitude)) then

begin

P[x-1]:=255;

Continue;

end;


```

        Weight[i-1][j-1]:=0;
    end;
end;
end;
end;
procedure NetOut(VIn:THopfVector;var VOut:THopfVector;Weight:TWeight);
var
    ex,good:boolean;
    t1,t2:THopfVector;
    i,j:integer;
    n:integer;
begin
    n:=Length(VIn);
    SetLength(VOut,n);
    SetLength(t1,n);
    SetLength(t2,n);
    for i:=1 to n do
        begin
            t2[i-1]:=0;
            end;
        ex:=false;
        t1:=VIn;
        repeat
            for i:=1 to n do
                begin
                    for j:=1 to n do
                        begin
                            t2[i-1]:=t2[i-1]+Round(Weight[i-1][j-1]*t1[j-1]);
                        end;
                    end;
                end;

            for i:=1 to n do
                begin
                    if t2[i-1]>1 then
                        begin
                            t2[i-1]:=1;
                        end;
                    end;
                good:=true;
                for i:=1 to n do
                    begin
                        if t1[i-1]<>t2[i-1] then
                            begin
                                good:=false;

```

```

        end;
    end;
    if good then
    begin
        ex:=true
    end
    else
    begin
        t1:=t2;
        for i:=1 to n do
        begin
            t2[i-1]:=0;
        end;
    end;
    until ex;
    VOut:=t2;
end;
procedure Compare(var MainRec:TRecArray;var
ArrRecords:TArrRecords;SNum:integer;var WI:TWinnerInfo);
var
    FFT:TFFT;
    i,j,k:integer;
    Img:TBitmap;
    Vectors:THopfVectors;
    TestVector,ResultVector:THopfVector;
    Weight:TWeight;
    Counts:TIntegerDynArray;
begin
    // Превращение массивов в вектора
    SetLength(Vectors,Length(ArrRecords));
    for i:=1 to Length(ArrRecords) do
    begin
        case SNum of
            1:begin
                FFT:=ArrRecords[i-1].Sensors.N1_FFT;
            end;
            2:begin
                FFT:=ArrRecords[i-1].Sensors.N2_FFT;
            end;
        end;
        ConvertArrayToImage(FFT,Img);
        SetLength(Vectors[i-1],(Img.Width*Img.Height));
        ConvertImageToVector(Img,Vectors[i-1]);
        Img.Free;
    end;
end;

```

```

// Получим тестируемый вектор
case SNum of
1:begin
    FFT:=MainRec.Sensors.N1_FFT;
end;
2:begin
    FFT:=MainRec.Sensors.N2_FFT;
end;
end;
ConvertArrayToImage(FFT,Img);
SetLength(TestVector,(Img.Width*Img.Height));
ConvertImageToVector(Img,TestVector);
Img.Free;
// Инициализация весов
SetLength(Weight,Length(TestVector),Length(TestVector));
for i:=1 to Length(TestVector) do
begin
    for j:=1 to Length(TestVector) do
    begin
        Weight[i-1,j-1]:=0;
    end;
end;
// Обучение сети
for k:=1 to Length(Vectors) do
begin
    Learn(Vectors[k-1],Weight);
end;

// Распознавание
NetOut(TestVector,ResultVector,Weight);
// Сравнение методом потенциальных функций
SetLength(Counts,Length(Vectors));
for i:=1 to Length(Vectors) do
begin
    Counts[i-1]:=0;
    for j:=1 to Length(Vectors[i-1]) do
    begin
        if Vectors[i-1][j-1]<>ResultVector[j-1] then
        begin
            Inc(Counts[i-1]);
        end;
    end;
end;
j:=Length(ResultVector);
k:=0;

```

```

for i:=1 to Length(Counts) do
begin
  if j>=Counts[i-1] then
  begin
    j:=Counts[i-1];
    k:=i-1;
  end;
end;
// Освобождение памяти
SetLength(Weight,0,0);
SetLength(TestVector,0);
SetLength(ResultVector,0);
for i:=1 to Length(Vectors) do
begin
  SetLength(Vectors[i-1],0);
end;
SetLength(Vectors,0);
SetLength(Counts,0);
// Результат
WI.ID:=IntToStr(ArrRecords[k].ID);
WI.Time:=ArrRecords[k].DtStr;
case SNum of
1:begin
  WI.Sign:=SignTypes[ArrRecords[k].Sensors.Sign1];
  WI.Descr:=ArrRecords[k].Sensors.Descr1;
end;
2:begin
  WI.Sign:=SignTypes[ArrRecords[k].Sensors.Sign2];
  WI.Descr:=ArrRecords[k].Sensors.Descr2;
end;
end;
end;
end.

```

```

unit USignalProcessing;
interface
uses
  UTypes;
type
  TSignalProcessing=class
    private
    public
      procedure
RecArray:TRecArray;Start,Finish:integer);
FFTConvert(var

```

```

function Compare(CompMethod:integer;var
MainRec:TRecArray;var StrResult:string;FileName:string):boolean;overload;
function Compare(CompMethod:integer;var
MainRec:TRecArray;var ArrRecords:TArrRecords;var
StrResult:string):boolean;overload;
function Compare(CompMethod:integer;var
MainRec:TRecArray;var ArrRecords:TArrRecords;SNum:integer;var
WI:TWinnerInfo):boolean;overload;
end;
implementation
uses
  Math,Dialogs,
  UMExpertSystem,UMClusterisation,
  UMHopfield,UMBackSpread;
procedure TSignalProcessing.FFTConvert(var
RecArray:TRecArray;Start,Finish:integer);
var
  i,j:integer;
  arg:Double;
  a,b,c,d,e,f:TArrDouble;
  RealStart,RealFinish:integer;
  n:integer;
begin
  RealStart:=Max(0,Start);
  RealStart:=Min(RealStart,Length(RecArray.Sensors.N1));
  RealFinish:=Max(0,Finish);
  RealFinish:=Min(RealFinish,Length(RecArray.Sensors.N1));
  RealFinish:=Max(RealStart,RealFinish);
  n:=RealFinish-RealStart+1;

  SetLength(a,n);
  SetLength(b,n);
  SetLength(c,n);
  SetLength(d,n);
  SetLength(e,n);
  SetLength(f,n);
  for i:=1 to n do
    begin
      a[i-1]:=RecArray.Sensors.N1[RealStart+i-1];
      b[i-1]:=RecArray.Sensors.N2[RealStart+i-1];
    end;
  for i:=1 to n do
    begin
      c[i-1]:=0;
      d[i-1]:=0;

```

```

e[i-1]:=0;
f[i-1]:=0;
for j:=1 to n do
begin
  arg:=-2*pi*(j-1)*(i-1)/n;
  c[i-1]:=c[i-1]+a[j-1]*cos(arg);
  d[i-1]:=d[i-1]+a[j-1]*sin(arg);
  e[i-1]:=e[i-1]+b[j-1]*cos(arg);
  f[i-1]:=f[i-1]+b[j-1]*sin(arg);
end;
c[i-1]:=c[i-1]/n;
d[i-1]:=d[i-1]/n;
e[i-1]:=e[i-1]/n;
f[i-1]:=f[i-1]/n;
end;
n:=Round(n/2);
for i:=1 to n do
begin
  RecArray.Sensors.N1_FFT.Magnitude[i-1]:=sqrt(sqr(c[i])+sqr(d[i]));
  RecArray.Sensors.N1_FFT.Frequency[i-1]:=(i-1)*49/14;
  RecArray.Sensors.N2_FFT.Magnitude[i-1]:=sqrt(sqr(e[i])+sqr(f[i]));
  RecArray.Sensors.N2_FFT.Frequency[i-1]:=(i-1)*49/14;
end;
end;
function TSignalProcessing.Compare(CompMethod:integer;var
MainRec:TRecArray;var StrResult:string;FileName:string):boolean;
begin
  Result:=false;
  if CompMethod<>0 then
  begin
    Exit;
  end;
  UMExpertSystem.Compare(MainRec,StrResult,FileName);
  Result:=true;
end;
function TSignalProcessing.Compare(CompMethod:integer;var
MainRec:TRecArray;var ArrRecords:TArrRecords;var StrResult:string):boolean;
begin
  Result:=false;
  case CompMethod of
    1:begin
      // Кластеризация
      UMClusterisation.Compare(MainRec,ArrRecords,StrResult);
    end
  else

```

```

        begin
            Exit;
        end;
    end;
    Result:=true;
end;
function TSignalProcessing.Compare(CompMethod:integer;var
MainRec:TRecArray; var ArrRecords:TArrRecords;SNum:integer;var
WI:TWinnerInfo):boolean;
begin
    Result:=false;
    case CompMethod of
        2:begin
            UMHopfield.Compare(MainRec,ArrRecords,SNum,WI);
        end;
        3:begin
            UMBBackSpread.Compare(MainRec,ArrRecords,SNum,WI);
        end
    else
        begin
            Exit;
        end;
    end;
    Result:=true;
end;
end.
```