

М. В. КІЯНОВСЬКИЙ¹, Н. І. ЦИВІНДА¹, А. В. ПІКІЛЬНЯК¹, В. В. ТРЕТЯК²

¹ "Криворізький національний університет", Кривий Ріг, Україна

² Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

"Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна

ВИБІР МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ НАДІЙНІСТЮ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ «ЗА СТАНОМ»

В матеріалах приведеної статті визначені методи оцінки працездатності промислового обладнання з метою вибору найбільш придатних для дослідження процесів, при умові безрозбірної ідентифікації його технічного стану і без виводу з експлуатації, що створить умови адекватності у визначенні регламентів та змісту ТОіР. Проведено аналіз методів визначення працездатності промислового обладнання з метою вибору найбільш придатних для дослідження процесів спрацювання гірничо-металургійного обладнання, при умові безрозбірної ідентифікації його технічного стану і без виводу з експлуатації показує, що це можуть бути тільки функціональні методи. Співставленні можливості наведених методів орієнтують науковий пошук на виконання досліджень по методу накопиченої вибірки узагальнюючого параметра технічного стану як часової функції. Метою досліджень є забезпечення умов адаптивного управління надійності та відновлення механізмів гірничо-металургійного обладнання на основі використання одномірних динамічних моделей процесів втрати працездатності. Також проведено огляд результатів досліджень, щодо перспективи впровадження стратегій експлуатації «за станом», приводить до висновку, що найбільш ефективним шляхом впровадження умов адаптивного управління процесами спрацювання та відновлення механізмів гірничо-металургійного обладнання є використання одномірних динамічних моделей надійності. Згідно з аналізом всіх відомих в сучасній науці методів рішення поставлених задач в світовій практиці серед засобів і методів контролю технічного стану машинних агрегатів найбільш ефективними є метод контролю порушень передаточних функцій механізмів під дією дефектів виготовлення, монтажу та експлуатації, що розвиваються у часі. В представлений статті усунуто недоліки стратегії експлуатації за напрацюванням, де тривалий час в програмах ТОіР використовувались ймовірні моделі надійності обладнання, що загальмував на довгий час застосування умов адекватності у визначенні регламентів та змісту ТОіР шляхом врахування причин розвитку деградаційних процесів, їх фізичної природи та видів дефектів обладнання.

Ключові слова: визначення технічного стану; режим реального часу; гірничо-металургійне обладнання; технічна діагностика.

1. Постановка проблеми

Визначення методів оцінки працездатності промислового обладнання з метою вибору найбільш придатних для дослідження процесів спрацювання обладнання, при умові безрозбірної ідентифікації його технічного стану і без виводу з експлуатації, що створить умови адекватності у визначенні регламентів та змісту ТОіР.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз методів визначення працездатності з метою вибору найбільш придатних для дослідження процесів спрацювання гірничо-металургійного обладнання, при умові безрозбірної ідентифікації

його технічного стану і без виводу з експлуатації [1 – 4, 12, 13] показує, що це можуть бути тільки функціональні методи. Співставлення можливостей наведених методів орієнтує на виконання досліджень по методу накопиченої вибірки узагальнюючого параметра технічного стану як часової функції.

Ці методи забезпечують найбільшу достовірність результатів, мінімальні витрати часу і мінімальну вартість визначення параметрів технічного стану [5, 6].

Вибраний метод відповідає максимальному значенню комплексного вектору конструктивно-функціональних характеристик технологічного обладнання промислових виробництв і підтверджує ідею моніторингу технічного стану на основі параметричних моделей з використанням узагальнюючих параметрів технічного стану для визначення

темпів спрацювання ресурсу і планування процесів відновлення працездатності обладнання «за станом».

3. Мета (завдання) дослідження

Забезпечення умов адаптивного управління надійності та відновлення механізмів гірничо-металургійного обладнання на основі використання одномірних динамічних моделей процесів втрати працездатності.

4. Основний матеріал дослідження

4.1. Огляд результатів досліджень

Огляд результатів досліджень [8], щодо перспективи впровадження стратегій експлуатації «за станом», приводить до висновку, що найбільш ефективним шляхом впровадження умов адаптивного управління процесами спрацювання та відновлення механізмів гірничо-металургійного обладнання є використання одномірних динамічних моделей надійності. Одномірна динамічна модель визначається як [7, 8]:

$$A(t_0) = \{X(t), D\}, t \in [0, t_0], \quad (1)$$

де $X(t)$ – визначальний (узагальнений) параметр стану, що змінюється у часі t на заданому інтервалі роботи $[0, t_0]$; D – допустима область зміни визначального параметра.

Згідно [8] моделі відмов механізмів, які використовують визначальні параметри називають параметричними. Використання таких моделей дозволяє провести оцінку технічного стану механізмів гірничо-металургійного обладнання за результатами вимірювання визначального (узагальнюючого) параметра, не чекаючи появи відмови механізму, що дозволяє керувати технічним станом машини в реальному часі.

Як визначальний параметр динамічної моделі відмови складних механізмів, за рекомендаціями інституту машинознавства ім. Благонравова [7] приймається інтегральний параметр коливального процесу, який супроводжує функціонування механізму, оскільки зміна властивостей цього процесу суворо корельована із зміною параметрів технічного стану механізму під дією деградаційних процесів.

Однак для рішення задач адаптивного управління швидкістю спрацювання і ефективності відновлення ресурсу технологічного і допоміжного обладнання гірничо-металургійного виробництва за результатами моніторингу необхідно:

– забезпечити умову інваріантності методу моніторингу процесів спрацювання та відновлення

обладнання технологічних систем гірничо-металургійних виробництв;

– вибрати вид визначального узагальнюючого параметра технічного стану, визначити закономірності його зміни в умовах виробничого використання обладнання;

– визначити концепцію вибору граничного значення визначального параметра;

– забезпечити розпізнавання технічних станів механізмів гірничо-металургійного обладнання для формування гнучких регламентів обслуговування, об'єм і зміст яких адекватний технічному стану механізму.

Згідно з аналізом всіх відомих в сучасній науці методів рішення поставлених задач в світовій практиці серед засобів і методів контролю технічного стану машинних агрегатів найбільш ефективними є метод контролю порушень передаточних функцій механізмів під дією дефектів виготовлення, монтажу та експлуатації, що розвиваються у часі. Передаточні функції визначаються характером перехідних процесів у структурі механізмів, які здійснюються в ході їх виробничого використання. Для механізмів гірничо-збагачувального обладнання характерні перехідні процеси. Якщо порівняти ці процеси за швидкістю зміни узагальнюючого параметру, як критерію оцінки процесів спрацювання механізмів, то найбільш інформативними у режимі реального часу є узагальнюючі параметри механізмів як коливальних систем.

З огляду на цей висновок, методи акустичної діагностики – [1-4, 7, 8] є найбільш чутливі до дефектів функціонування пристроїв, забезпечуючи контроль їх технічного стану оперативно і без розбирання і, згідно [4], в 3 рази дешевше альтернативних методів.

Метод вібродіагностичного моніторингу зручний тим, що об'єкт діагностики в цьому випадку має одномірний простір діагностичних ознак, а сам діагностичний параметр X інтегрально виражає вплив на технічний стан обладнання багатьох його дефектів і несправностей.

У процесі функціонування механізмів технологічного обладнання при переробці залізорудної сировини енергія приводу перетворюється в роботу його виконавчих робочих органів.

Всі деталі кінематичних і силових ланцюгів механізмів, через які передається і перетворюється енергія приводу знаходяться в режимі динамічної взаємодії. При цьому вважається, що в будь-якому режимі справного функціонування, взаємодія передавальних ланцюгів повинна спромогтися до динамічної рівноваги.

Відомо [7, 9-15], що динамічна взаємодія елементів механізму породжує коливальні процеси, а їх

характеристики будуть корельовані з глибиною розвитку дефекту.

При цьому розвиток дефектів і деградаційних процесів впливає на параметри динамічної системи у вигляді зміни характеру взаємодії елементів, зміни функції примусової сили, передавальної функції механізму.

4.2. Вибір засобів моделювання процесів спрацювання механізмів гірничо-металургійного обладнання для безрозбірної оцінки його технічного стану в режимі реального часу

Збереження параметрів динамічної системи обладнання вимагає підвищення енергетичних витрат на підтримку динамічної рівноваги елементів механізму.

Енергетичні витрати на підтримку умови рівноваги істотно впливають на ККД механізму і технологічної машини загалом, і стають досить інформативним джерелом відомостей про технічний стан елементів механізму, наявність дефектів або розвитку деградаційних процесів.

Таким чином, динамічні реакції взаємодії елементів можна розглядати як джерело інформації про технічний стан елементом механізму. Вимірюючи параметри динамічних реакцій можна встановити залежність:

$$T_i = F(R_i), \quad (2)$$

де T_i – параметр технічного стану; R_i – відповідна реакція взаємодії елементів механізму.

Отже ознака R посилюється або змінюється при появі або розвитку дефектів. Оскільки R – це силова характеристика елемента, який генерує коливання, то вона визначає енергетичні витрати джерела коливань, які збільшуються в зв'язку з розвитком дефекту.

У ході продуктивного використання технологічних машин, тобто в умовах їх справного функціонування, загальна передавальна функція їх механізмів знаходиться в межах допусків, але зазнає все більших флуктуацій за рахунок зміни і розузгодження передавальних функцій елементів механізмів, що не контролюються.

В умовах експлуатації збурюючі впливи і динамічні характеристики механізму є параметрами, що не спостерігаються.

Контроль енергетичного навантаження елементів механізмів гірничо-металургійного обладнання є найбільш інформативним критерієм швидкості спрацювання їх ресурсу, і тому використання цього критерію як уніфікованого інваріантного засобу контролю процесів спрацювання ґрунтується на наступних доказах. При експлуатації механізмів

гірничо-металургійного обладнання на них діють різні види енергії (механічна, теплова, хімічна та ін.), але розвиток і активізація процесів інтенсивного спрацювання їх елементів настає коли рівень енергії перевершує деякий критичний. Основним наслідком дії різних видів енергії є зношення поверхонь, зміна їх геометричної форми, порушення законів функціонування.

Частково попередження наступу критичних рівнів енергетичного навантаження і, як наслідок, попередження підйому інтенсивності спрацювання механізмів від дії механічних, теплових, хіміко-технологічних навантажень, досягається оперативним контролем функціональних параметрів: температури, тиску, вологи, складу хімічних інгредієнтів середовища, параметрів маслосистем і т.п.

Але організація процесів експлуатації не орієнтована на контроль і попередження критичного рівня динамічного навантаження, що створює умови інтенсивного спрацювання механізмів.

Ця обставина обґрунтовує введення критеріїв контролю рівня динамічного навантаження (Вектор динамічної урівноваженості) з метою запровадження інваріантного критерію попередження умов спрацювання і моделювання процесів втрати працездатності обладнання.

На цих умовах потрібна мінімальна сукупність статичних і динамічних параметрів, яка є інформаційною базою для формалізації методів побудови алгоритмів визначення технічного стану на основі прийнятої математичної моделі.

У нашому випадку як початкову математична модель краще прийняти модель «чорного ящика» з допомогою якої працездатний або непрацездатний стан машини визначається як стан динамічної системи в кожний момент часу значеннями вхідних, внутрішніх і вихідних параметрів.

Вибір і аналіз таких моделей став темою окремого дослідження [3].

Всі машини структурно-подібних груп являють собою комплекс різнорідних елементів, сполучених в механічні, гідравлічні, пневматичні, електричні, газодинамічні і комбіновані системи.

Кожна машина функціонуючи і взаємодіючи із зовнішнім середовищем, породжує безліч фізичних і хімічних процесів, які характеризуються вихідними параметрами.

Вихідні параметри можна розділити на робочі (функціональні) і супутні (динамічні, шуми, стук, вібрації, коливання, люфти і ін.).

Вихідні параметри істотно залежать від стану структурних елементів і характеру їх взаємодії. З іншого боку вихідні параметри тісно корельовані з макроструктурою, станами енергетичного навантаження елементів машини і тому служать в ролі не-

прямих ознак для визначення її технічного стану без розбирання.

Вибір вихідних параметрів і включення їх в групу діагностичних, виконується на основі їх відповідності принципам адаптивного керування, а також достовірності, інформативності і інших критеріїв, які повинні бути розглянуті окремо.

Таким чином, впровадження маловитратних стратегій обслуговування «за станом» насамперед пов'язане з створенням інформаційної і методичної бази систем моніторингу, необхідної для аналізу вихідних стаціонарних функціональних параметрів і динамічних реакцій машини на робочий процес, з метою визначення її технічного стану в мінімальному прикметникову просторі.

Якщо зберегти відомі способи опису механічного об'єкта у часі або частотній області і представити механізм у вигляді динамічної системи з п мірами свободи:

$$Mx^{**} + Kx^* + Cx = G, \quad (3)$$

де M , K , C – симетричні матриці ($n \times n$) коефіцієнтів інерції, демпфування і жорсткості, а x і G – n -мірні вектори координат і діючих сил.

При цьому передбачається, що динамічні реакції взаємодії елементів що змінюються при появі дефекту входять в рівняння в неявному вигляді. Цей висновок незадовільний з точки зору інтересів контролю технічного стану. У такому випадку, якщо динамічну модель механічного об'єкта записати в операторному вигляді:

$$X(t) = LG(t), \quad (4)$$

де $X(t)$ – вектор вихідних сигналів; $G(t)$ – вектор вхідних впливів і зберегти незмінними вхідні впливи, то ми будемо реєструвати зміни вихідних сигналів механізму, тобто передавальна функція механізму стає функцією двох аргументів $L[G(t)\Delta S(\omega)]$ і для оцінки технічного стану треба встановити значення аргументу і міри його впливу на оператор системи L .

Реакцію на вхідний вплив можна записати за допомогою системного оператора $X(t) = Ly(r)$. Динамічна реакція буде лінійною якщо:

$$L(y_1 + y_2) = Ly_1 + Ly_2 \text{ і } L(\alpha y) = \alpha Ly. \quad (5)$$

У цьому випадку гармонічний вхідний сигнал, проходячи через лінійну систему, залишається незмінним за формою, і набуває лише іншої амплітуди і початкову фазу. У частотній області для лінійних систем вхідний вплив викликає реакцію на тій же

частоті, а результат одночасного впливу декількох сил є суперпозицією відгуків на кожну з них. При цьому щодо енергетичних спектрів $S_x(\omega) = S_y(\omega)[H(j\omega)]^2$ передавальна функція. У разі корельованих впливів спектральна щільність потужності реакції на j -му виході має вигляд:

$$S_{x_j}(\omega) = \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^p H_{jk}(\omega) H_{jl}(\omega) S_{q_k q_l}(\omega), \quad (6)$$

де $H(\omega)$ – комплексно-зв'язана функція, що може бути вивчена експериментально за допомогою спектральної щільності потужності коливань

$$S_i(\omega) = [H_i(\omega)]^2 S_{q_i}(\omega), \quad (7)$$

де H_i – імпульсна перехідна функція елемента, що характеризує відгук елемента на i -й одиничний вплив; $S_{q_i}(\omega)$ – спектр потужності i -го впливу; ω – кругова частота,

$$H_i = \frac{\omega_c^2}{1 - (\omega/\omega_c)^2 + j(\omega/\omega_c) \frac{1}{Q}}, \quad (8)$$

де ω – частота i -го впливу (збудження); ω_c – власна частота i -го елемента $\sqrt{(c/m)}$; Q – добротність джерела коливань $\sqrt{(cm/k)}$; $S_{q_k q_l}$ – взаємний спектр K -го і l -го впливів.

Таким чином, кількісною мірою появи і зростання дефекту обладнання може бути рівень і темп зміни спектральної щільності i -ої дільниці енергетичного спектра діагностичного сигналу, що є передумовою вибору методу безрозбірного оцінювання технічного стану обладнання.

Складність частотного складу енергетичного спектра зумовлена складністю коливальних процесів, що генеруються деталями і вузлами механізму в процесі їх продуктивного використання.

При аналізі енергетичного спектра передбачається, що зародження кожного дефекту, його розвиток виявляється у вигляді частотного компонента різної інтенсивності.

Закономірність зміни інтенсивності характеризує характер і темп розвитку дефекту [14].

Діагностичний сигнал, при концепції безрозбірного контролю, є інтегрованим, тобто таким, що містить діагностичну інформацію про сукупність діагностичних реакцій елементів механізму у вигляді коливальних процесів різної природи.

Під діагностичною реакцією елемента, який контролюється, мається на увазі відгук елемента виражений у вигляді коливань, що генеруються ним на вплив на нього чинників виготовлення, збирання, монтажу і експлуатації.

Отже об'єктивна діагностична інформація про технічний стан деталей і вузлів механізмів збагачувального обладнання може бути знайдена в аналізі енергетики процесів їх взаємодії, так як в процесі перетворення енергії джерела в роботу генеруються змінні сили, які збуджують коливання окремих частин машини.

Для вивчення діагностичних реакцій взаємодії деталей і вузлів механізму необхідно їх описати за допомогою диференціальних (у часі) або алгебраїчних (в частотній області) рівнянь.

Однак треба помітити, що реакціями, які контролюються методами безрозбірного контролю є тільки вихідні реакції кінцевих ланок, які є суперпозицією реакцій взаємодії структурних елементів механізму і можуть бути описані через інтеграл Дюамеля:

$$X_j(t) = \sum_{j=1}^p x_{ji}(t) = \sum_{j=1}^p \int_0^{\infty} h_{ji}(\tau) q_i(t-\tau) d\tau, \quad (9)$$

де $q_i(t)$ – вплив на i -му вході; $h_{ji}(t)$ – імпульсна перехідна функція.

Реалізація такого методу апаратними засобами можлива, але вона пов'язана зі значними витратами і тому треба знаходити способи вирішення цієї задачі без збільшення експлуатаційних витрат. Для цього треба вивчити склад чинників і міру їх впливу на рівень динамічної реакції механізму. На першому етапі обмежимося вивченням наступних чинників:

- 1) рівень змушуючих сил;
- 2) пружно-інерційні характеристики елементів системи;
- 3) дефекти виготовлення, збирання, експлуатації.

У такому складі процеси спрацювання механізмів через рівень енергетичного навантаження їх деталей і динамічних реакцій взаємодії ще не вивчалися, але саме такий склад процесів спрацювання задовольняє інформаційну забезпеченість діагностичного моніторингу технічного стану.

Висновки

1. У статті розроблено методу визначення максимальної придатності методів для моніторингу і практичного використання параметрів процесів спрацювання та відновленню ресурсу для впровадження адаптивного керування надійністю гірничо-металургійного обладнання «за станом».

Аналіз вищенаведених методів визначення працездатності з метою вибору найбільш придатних для дослідження процесів спрацювання гірничо-металургійного обладнання при умові безрозбірної ідентифікації його технічного стану і без виводу з

експлуатації показує, що це можуть бути тільки функціональні методи.

Співставлення можливостей наведених методів орієнтує на виконання моніторингу по методу накопиченої вибірки узагальнюючого параметра технічного стану як часової функції.

Цей метод забезпечує найбільшу достовірність результатів, мінімальні витрати часу і мінімальну вартість визначення параметрів технічного стану. Вибраний метод відповідає максимальному значенню комплексного вектору конструктивно-функціональних характеристик технологічного обладнання збагачувальних виробництв і підтверджує ідею моніторингу технічного стану на основі параметричних моделей з використанням узагальнюючих параметрів технічного стану для визначення темпів спрацювання ресурсу і планування процесів відновлення працездатності обладнання «за станом».

Серед приведених методів названим критеріям для задач аналізу факторів, що визначають темпи спрацювання ресурсу в експлуатації і зміст ремонтно-відновлювальних робіт у процесах технічного обслуговування, більше відповідає метод характерних дефектів, який повинен бути дослідженим і адаптованим для гірничо-металургійного обладнання для складання змісту його ремонтно-відновлювальних робіт «за станом».

Аналіз всіх відомих у сучасній науці методів моніторингу технічного стану дозволив обґрунтувати вибір тих, які створюють наукову базу технологій зменшення швидкості спрацювання та адаптивного відновлення ресурсу за критеріями, які сприяють відносному зменшенню в 2-3 рази рівня експлуатаційних витрат на утримання гірничо-збагачувального обладнання при забезпеченні належного рівня його надійності і ефективності використання.

2. Виходячи з вимог до вибору методу моніторингу технічного стану встановлено, що найбільш інформативним, найбільш чутливим методом оперативної оцінки у режимі реального часу процесів спрацювання механізмів є метод оцінки ступеню і інтенсивності спрацювання за критеріями росту потужності коливального збудження зони взаємодії деталей механізмів при появі, розвитку дефектів та накопичення пошкоджень від їх дії. З огляду на цей висновок, методи акустичної діагностики – найбільш чутливі до дефектів функціонування пристроїв, забезпечуючи контроль їх технічного стану оперативно, без розбирання і в 3 рази дешевше альтернативних методів.

Метод вібродіагностичного моніторингу зручний тим, що об'єкт діагностики в цьому випадку має одновимірний простір діагностичних ознак, а сам діагностичний параметр X інтегрально виражає вплив

на технічний стан обладнання багатьох його дефектів і несправностей.

3. Для кожного процесу руйнування чи пошкодження деталей існують енергетичні межі, перехід за які обумовлює зростання інтенсивності швидкості спрацювання обладнання.

В такому разі для моніторингу технічного стану обладнання потрібно пов'язати фізичну суть всіх можливих процесів пошкодження і енергетичного бар'єру їх інтенсивного протікання.

Для реалізації цієї умови встановлена одна спільна особливість для всіх процесів спрацювання, яка полягає у тому, що кількісною мірою появи і зростання дефекту чи пошкодження механізмів обладнання може бути рівень і темп зміни спектральної щільності і-ої дільниці енергетичного спектра коливального збудження зони взаємодії деталей механічних вузлів.

4. Узагальнюючий параметр працездатності обладнання має функціональну залежність від середньої густини потоку енергії коливального збудження зони взаємодії деталей механічних вузлів від дії конструктивно-технологічних дефектів та експлуатаційних пошкоджень, оцінюється за величиною приросту енергії у рівнянні Лагранжа і змінюється пропорційно квадрату швидкості коливального збудження.

5. Для прискорення рішення задачі побудови уніфікованих систем моніторингу у масштабах галузі, розроблено методики і умови інваріантного використання методу моніторингу технічного стану, який легко адаптується до конкретної технологічної або енергетичної машини, і забезпечує мінімізацію швидкості процесів спрацювання та відновлення ресурсу на основі:

– структурно-параметричної систематизації і уніфікації технологічних і енергетичних машин збагачувальних виробництв за критеріями макроструктури, що дозволяє у процесах ідентифікації технічного стану обмежитись п'ятьма типовими діагностичними моделями (діагностична модель дефектів деталей роторного типу, діагностична модель дефектів опор ковзання, діагностична модель дефектів опор кочення, діагностична модель дефектів кінематичних передач, діагностична модель дефектів базових конструкцій);

– подальшому розкриттю закономірностей спрацювання ресурсу обладнання за рахунок визначення параметру спрацювання за інтегралом Дюамеля, як наслідку сумісної дії експлуатаційних навантажень, комплексу дефектів механізмів та пружно-інерційних властивостей конструкцій та матеріалів їх складових;

– оцінки і зниженню енергетичного навантаження деталей механізмів обладнання, а відповідно і

інтенсивності спрацювання їх ресурсу, за критерієм приросту примусових сил у рівнянні його динамічної рівноваги, визначеного за принципами Д'Аламбера, тому що ресурс механізму має квадратичну залежність від енергії невривноважених мас, виявлення і усунення яких засобами технічного обслуговування є значним резервом зниження швидкості спрацювання ресурсу;

– моделюванні процесів втрати працездатності і побудова процесів відновлення обладнання за допомогою динамічних параметричних моделей відмов, як засобу збільшення на 30-90 % використання індивідуальних ресурсів механізмів обладнання;

– використання динамічних реакцій взаємодії механізмів, як інформаційного критерію процесів втрати їх працездатності на основі оцінки параметрів їх коливальних рухів при виконанні функціональних дій, як найбільш чутливого засобу контролю появи і розвитку деградаційного(их) процесу(ів);

– застосуванні спектральних методів аналізу коливальних процесів та акустичних властивостей конструкцій для ідентифікації причин розвитку дефектів, попередженню аварійних станів і побудові регламентів технічного обслуговування «за станом», як найбільш надійного та швидкодіючого у режимі реального часу, так як множина дефектів технічного стану визначається у одновірному просторі прикмет;

– використання економічно обґрунтованих граничних рівнів визначальних параметрів технічного стану механізмів обладнання;

– безрозбірного контролю у режимі реального часу параметрів технічного стану без виводу обладнання з експлуатації.

Література

1. Артоболевский, И. И. Введение в акустическую динамику машин [Текст] / И. И. Артоболевский, Ю. И. Бобровицкий, М. Д. Генкин. – М. : Машиностроение, 1979. – 276 с.
2. Биргер, И. А. Техническая диагностика [Текст] / И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.
3. Кияновский, Н. В. Средства и системы для безразборной оценки технического состояния горно-металлургического оборудования [Текст] / Н. В. Кияновский, А. В. Басков // Черная металлургия. – 1992. – С. 23-27.
4. Кияновський, М. В. Діагностичне забезпечення технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) гірничо-металургійного обладнання [Текст] / М. В. Кияновський. – Кривий Ріг : Вид-во «Окрант принт», 2015. – 364 с.
5. Вибрация центробежных нагнетателей природного газа. Нормы и методика оценки вибрационного состояния. (Обзорная информация. Сер.

Химическое машиностроение) [Текст]. – М. : Институт научно-технической информации и технико-экономических исследований по химическому и нефтяному машиностроению. – 1990. – 520 с.

6. Влияние технического обслуживания на рост прибыли и конкурентоспособности [Текст] // "Pract. Lubr. and Maint". – 1987. – №3. – С. 13-16.

7. Генкин, М. Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов [Текст] / М. Д. Генкин, А. Г. Соловьева. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

8. Надежность и эффективность в технике [Текст] : справочник. В 10 т. / под. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1987. – Т.9: Техническая диагностика. – 344 с.

9. Moltzer, G. Разработка и опробование метода виброакустической диагностики машин и установок [Текст] / G. Moltzer // Akdwiss DDK. Instr. Mech." [Ber]. – 1986. – № 6. – С. 133-151.

10. KnuthTh. Распознавание неисправностей и анализа вибраций – новые возможности технического обслуживания [Текст] / KnuthTh // Masehinenschaden. – 1988. – № 2. – С. 70-74.

11. Хотта, Тэйтাকা. Основы применения диагностики оборудования [Текст] / Тэйтাকা Хотта // Пурантоэндзиния/PlantEng. – 1988. – № 3. – С. 8-11.

12. Hills, Peter W. Техническая диагностика оборудования на основе изучения данных о вибрациях [Текст] / Peter W. Hills // "Int. Conf. Cond. NionitBrington", 21-23 May, 1986. Granfield, 1986. – С. 231-235.

13. Kiyanovskiy, M. V. The increasing of mining machines resource rates by diagnostic maintenance-proving [Text] / M. V. Kiyanovskiy, E. V. Bondar // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 3. – P. 292-297.

14. Kiyanovskiy, M. V. Control over the technical condition of mechanical components of industrial equipment base donenergy parameter of its deterioration [Текст] / M. V. Kiyanovskiy, N. I. Tsyvinda / Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем. Матеріали Х міжнародної науково-практичної конференції, 29-30 квітня 2020 р. – Чернігів. – Т. 1. – С. 35-37.

15. Третьяк В. В. Мультиагентная система синтеза технических решений в области импульсной технологии для объектов аэрокосмического комплекса [Текст] / В. В. Третьяк // Proceedings XXIV international conference «New Leading technologies in machine building» Rybachie, Ukraine. September 3–8. – 2014. – P. 15.

References

1. Artobolevskiy, Y. Y., Bobrovnyczkyj, Yu. Y., Genkyn, M. D. Vvedeniye v akusticheskuyu dynamiku mashyn [Introduction to the acoustic dynamics of machines]. Moscow, Mashynostroenie – Mechanical engineering Publ., 1979. 276 p.

2. Byrger, Y. A. *Texnycheskaya dyagnostyka* [Technical diagnostics]. Moscow, Mashynostroenie – Mechanical engineering Publ., 1978. 240 p.

3. Kyuanovskiy, N. V., Baskov, A. V. Sredstva y sy'stemy dlya bezrazbornoy ocenky texnycheskogo sostoyaniya gorno-metallurgicheskogo oborudovaniya [Tools and systems for the bezrazbornoy estimation of technical state of mountain and metallurgical equipment]. Chernaya metallurgiya – Black metallurgists Publ., 1992, pp. 23-27.

4. Kiyanovskiy, M. V. Diagnostichne zabezpechennya texnichnogo obslugovuvannya i remontu (TOiR) gimny`cho-metallurgijnogo obladdnannya [Diagnostic providing of technical service and repair (TOiR) of mountain and metallurgical equipment]. Kryvoi Rog, Vyd-vo «Oktantprynt» Publ., 2015. 364 p.

5. Vybracyya centrobezhnnykh nagnetatelej pryrodnogo gaza. Normi y metodyka ocenky vybracyynogo sostoyaniya. (Obzornaya ynformacyya. Ser. Xumycheskoe mashynostroeniye) [Vibration of centrifugal superchargers of natural gas. Norms and method of estimation of vibration state. (Survey information. Is grey. Chemical mashynostroeniye)]. Moscow, Institut nauchno-texny`cheskoj ynformacyy y texnyko-ekonomycheskyyh yssledovanyj po xumycheskomu y`neftyanomu mashyostroenyuy Publ., 1990. 520 p.

6. Vlyyanye texnycheskogo obsluzhyvaniya na rost pry'bily y konkurentosposobnosti [Influencing of technical service on growth of income and competitiveness]. *Pract. Lubr. and Maint*, 1987, no. 3, pp. 13-16.

7. Genkyn, M. D., Soloveva, A. G. *Vybroakustycheskayady`agnosty`ka mashyn y mexany`zmov* [Vibroakusticheskaya diagnostics of machines and machineries]. Moscow, Mashynostroenie – Mechanical engineering Publ., 1987. 288 p.

8. Nadezhnosity effektivnost v texnyke [Reliability and efficiency in technique]. Moscow, Mashynostroenie – Mechanical engineering Publ., 1987, vol. 9: *Texnycheskaya dyagnostyka* [Technical diagnostic]. 344 p.

9. Moltzer, G. *Razrabotka y oprobovaye metoda vybroakusticheskoy dy`agnostyky mashyn y ustanovok* [Development and testing of method of vibroakusticheskoy diagnostics of machines and options]. *Akdwiss DDK. Instr. Mech.* [Ber], 1986, no. 6, pp. 133-151.

10. KnuthTh. Raspoznavany`e ney`pravnostej y analiza vybracy`j – novie vozmozhnosti texnycheskogo obsluzhyvaniya [Recognition of neipravnostej and analysis of vibrations – new possibilities of technical service]. *Masehinenschaden*, 1988, no. 2, pp. 70-74.

11. Xotta, Tejtaka. Основы применениya diagnostyky oborudovaniya [Bases of application of diagnostiki equipmen] *Purantoendzyniyya PlantEng*, 1988, no. 3, pp. 8-11.

12. Hills, Peter W. *Texnycheskaya diagnostyka oborudovany`ya na osnove y`zucheny`ya dannykh o vyracyyax* [Technical diagnostika equipment on the basis of study of data about vibrations]. *Int. Conf. Cond.*

NionitBrington, 21-23 May, 1986, Granfield, 1986, pp. 231-235.

13. Kiyanovskiy, M. V., Bondar, E. V. The increase in efficiency of mining machines resource rates by diagnostic maintenance-proving. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 3, pp. 292-297.

14. Kiyanovskiy, M. V., Tsyvinda, N. I. Control over the technical condition of mechanical components of industrial equipment base on energy parameter of its deterioration. *Kompleksne zabezpechennya yakosti tehnologichnykh procesiv ta system. Materialy X mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferenciyi [Complex providing of quality of technological process-*

es and systems. Materials of the X international naukovopractichnoi conference], 29 - 30 April 2020, Chernigiv, vol. 1, pp. 35-37.

15. Tret'yak, V. V. Multiagentnaya sistema sintezy i sinteza texnycheskykh resheniy v oblasti ymпульсноj tehnologyy dlya ob'ektov aэрокосмического комплекса [The Multiagentnaya system of synthesis of technical decisions in area of impulsive technology for the objects of aerospace complex]. *Proceedings XXIV international conference «New Leading technolog sesin machse building»*, Rybachie, Ukraine, September 3–8, 2014, pp. 15.

Поступила в редакцию 12.05.2020, рассмотрена на редколлегии 15.08.2020

ВЫБОР МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ «ПО СОСТОЯНИЮ»

*Н. В. Кияновский, Н. И. Цывинда,
А. В. Пикильняк, В. В. Третьяк*

В материалах приведенной статьи определены методы оценки работоспособности промышленного оборудования с целью выбора наиболее пригодных для исследования процессов, при условии идентификации без разбора технического состояния и без вывода из эксплуатации, что создаст условия адекватности в определении регламентов и содержания ТОиР. Проведен анализ методов определения работоспособности промышленного оборудования с целью выбора наиболее пригодных для исследования процессов работы горно-металлургического оборудования, при условии идентификации без разбора его технического состояния и без вывода из эксплуатации показывает, что это могут быть только функциональные методы. Сопоставление возможностей приведенных методов ориентируют научный поиск на выполнение исследований по методу накопленной выборки обобщающего параметра технического состояния как часовой функции. Целью исследований является обеспечение условий адаптивного управления надежностью и возобновления механизмов горно-металлургического оборудования на основе использования одномерных динамических моделей процессов потери работоспособности. Также проведен обзор результатов исследований, относительно перспективы внедрения стратегий эксплуатации «по состоянию», что приводит к выводу о наиболее эффективном пути внедрения условий адаптивного управления процессами работы и возобновления механизмов горно-металлургического оборудования – использование одномерных динамических моделей надежности. Согласно проведенному анализу всех известных в современной науке методов решения поставленных задач в мировой практике среди средств и методов контроля технического состояния машинных агрегатов наиболее эффективными является метод контроля нарушений передаточных функций механизмов под действием дефектов изготовления, монтажа и эксплуатации, которые развиваются во времени. В представленной статье устранены недостатки стратегии эксплуатации по наработке, так некоторое время в программах ТОиР использовались вероятностные модели надежности оборудования, что затормаживало время применения условий адекватности в определении регламентов и содержания ТОиР путем учета причин развития процессов деградации, их физической природы и видов дефектов оборудования.

Ключевые слова: определение технического состояния; режим реального времени; горное и металлургическое оборудование; техническая диагностика.

CHOICE OF MODELS FOR ADAPTIVE CONTROL BY RELIABILITY OF INDUSTRIAL EQUIPMENT «ON STATE»

M. Kiyanovskiy, N. Civinda, A. Pikilnyak, V. Tretyak

In materials of the resulted article methods are definite of estimation of the capacity of industrial equipment with the target of choice of the processes most suitable for research, on condition of authentication without the analysis of technical state and conclusion from exploitation, that will create the terms of adequacy in the decision of regulations and maintenance TOiR. The analysis is conducted of methods of a decision of capacity of industrial equipment with the target of choice of the processes most suitable for research of work of mountain and metallurgical equipment, on condition of authentication without the analysis of its technical state and without conclusion from

exploitation shows that there can be such only functional methods. Of possibilities of the resulted methods orient comparison scientific search on implementation of researches on the method of the accumulated selection of summarizing parameter of a technical state as a sentinel function. Of researches providing is a target of terms of adaptive control of reliability and renewal of machinery of the mountain and metallurgical equipment based on the use of dynamic models of processes of loss of capacity. Also, a review is conducted of results of researches, concerning the prospect of the introduction of strategies of exploitation «on the state», that results in conclusion, that by the most effective path of the introduction of terms of adaptive process control of work and renewal of machinery of the mountain and metallurgical equipment is the use of dynamic models of reliability. Consonant to the analysis of all methods known in the modern science of decision of the put tasks in the world practice among tools and methods of control of the technical state of machine aggregates most effective to be a present method of control of violations of transmission functions of machinery under the action of bugs of making, editing, and exploitation, which develop in time. In the presented article lacks are removed of the strategy of exploitation on work, some so time in the programs TOiR probabilistic models were used of reliability of equipment, that was braked by the time application of terms of adequacy in the decision of regulations and maintenance TOiR by consideration of reasons of development of processes of degradation, their physical nature and types of bugs of equipment.

Keywords: decision of technical state; real-time mode; mountain and metallurgical equipment; technical diagnostics.

Кіяновський Микола Володимирович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. технології машинобудування, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна.

Цивінда Наталя Іванівна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технології машинобудування, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна.

Пікілляк Андрій Валерійович – канд. техн. наук, доцент каф. кафедри технології машинобудування, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна.

Третяк Володимир Васильович – канд. техн. наук, доц., проф. каф. технологій виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Mikola Kiyanovskiy – Doctor of Technical Sciences, Professor, professor of department of department of technology of construction of machines, Kryvyi Rih National University, Krivyyi Rig, Ukraine, e-mail: kiyanovskiy.nikolay@gmail.com.

Natalia Civinda – PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of department of department of technology of construction of machines, Kryvyi Rih National University, Krivyyi Rig, Ukraine, e-mail: n.i.civinda@gmail.com.

Andriy Pikilnyak – PhD in Engineering Sciences, Associate Professor of department of department of technology of construction of machines, Kryvyi Rih National University, Krivyyi Rig, Ukraine, e-mail: pikilnyak@gmail.com.

Volodimir Tretyak – PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of Department of Aircraft Engine Manufacturing Technologies, National Aerospace University “Kharkov Aviation Institute”, Kharkov, Ukraine, e-mail: v.tretyak@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0003-4493-2689.