

А. І. ВАЖИНСЬКИЙ, С. Ф. ЖУКОВ

МЕТОДИКА ОЦІНКИ РЕСУРСУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ЦЕХІВ

Прогнозування займає центральне місце в управлінні виробництвом та інфраструктурою. Розробка нових методів визначення залишкового ресурсу устаткування є важливим завданням, спрямованим на підвищення ефективності використання промислових електротехнічних комплексів. Вирішення завдання достовірного визначення стану енергетичного обладнання в гірничо-металургійному комплексі дозволяє перейти від застарілої системи планово-попереджувальних ремонтів до обслуговування за станом агрегату. Складні технічні системи характеризуються складними нелінійними взаємодіями між складовими їх елементами, складними сценаріями причинно-наслідкових зв'язків між небезпечними, імовірнісними подіями та процесами, що відбуваються під час експлуатації цих систем. Як наслідок, розробляються методи та інструменти для оцінки механізмів зносу та управління ними у галузях з високим рівнем ризику. У статті наведено результати, пов'язані з розробкою методики оцінки залишкового ресурсу промислового обладнання. Запропоновано алгоритм оцінки залишкового ресурсу енергетичного обладнання, що базується на порівнянні результатів розрахунку прогнозних значень критеріїв залишкового ресурсу промислового обладнання з нормативними значеннями. У методології використовуються ймовірні математичні методи для прогнозування залишкового терміну служби та інформація, зібрана в ході аудитів та моніторингу обладнання. Поряд із класичними методами наведено методику, що базується на використанні всього потенціалу сучасної елементної бази мікропроцесорної техніки та технологій застосування штучних нейронних мереж, машинного навчання, «великих даних». На основі застосування ймовірнісного аналізу запропоновано методику контролю прогнозного залишкового ресурсу енергетичного обладнання, для якої розроблено алгоритм вирішення задач діагностики із застосуванням нейронних мереж.

Ключові слова: діагностика, штучні нейронні мережі, ефективність, надійність, експертна система, прогнозування, технічний стан, ідентифікація, ймовірнісні математичні методи, залишковий термін служби.

А. И. ВАЖИНСКИЙ, С. Ф. ЖУКОВ

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РЕСУРСА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТАЛУРГИЧЕСКИХ ЦЕХОВ

Прогнозирование занимает центральное место в управлении производством и инфраструктурой. Разработка новых методов определения остаточного ресурса оборудования – важная задача, направленная на повышение эффективности использования промышленных электротехнических комплексов. Решение задачи достоверного определения состояния энергетического оборудования в горно-металлургическом комплексе позволяет перейти от устаревшей системы планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по текущему состоянию агрегата. Сложные технические системы характеризуются сложными нелинейными взаимодействиями между составляющими их элементами, сложными сценариями причинно-следственных связей между опасными, вероятностными событиями и процессами, происходящими при их эксплуатации. Как следствие, разрабатываются методы и инструменты для оценки механизмов износа и управления ими в отраслях с высоким уровнем риска. В статье представлены результаты, связанные с разработкой методики оценки остаточного ресурса промышленного оборудования. Предложен алгоритм оценки остаточного ресурса энергетического оборудования, основанный на сравнении результатов расчета прогнозных значений критериев остаточного ресурса промышленного оборудования с нормативными значениями. В методологии используются вероятностные математические методы для прогнозирования остаточного срока службы и информация, собранная в ходе аудитов и мониторинга оборудования. Наряду с классическими методами приведены методики, базирующиеся на использовании всего потенциала современной элементной базы микропроцессорной техники и технологий применения искусственных нейронных сетей, машинного обучения, «больших данных». На основе применения вероятностного анализа предложена методика контроля прогнозного остаточного ресурса энергетического оборудования, для которой разработан алгоритм решения задач диагностики с применением нейронных сетей.

Ключевые слова: диагностика, искусственные нейронные сети, эффективность, надежность, экспертная система, прогноз, техническое состояние, идентификация, вероятностные математические методы, остаточный полезный срок службы.

A. I. VAZHINSKIY, S. F. ZHUKOV

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE RESOURCE OF POWER EQUIPMENT OF METALLURGICAL WORKSHOPS

Prognostic is central to manufacturing and infrastructure management. The development of new methods for determining the residual resource of equipment is an important task aimed at increasing the efficiency of using industrial electrical complexes. Solving the problem of reliably determining the state of power equipment in the mining and metallurgical complex makes it possible to move from an outdated system of scheduled preventive maintenance to maintenance based on the current state of the unit. Complex technical systems are characterized by complex nonlinear interactions between their constituent elements, complex scenarios of cause-and-effect relationships between hazardous, probabilistic events and processes occurring during their operation. Therefore, methods and tools are being developed to assess and manage wear mechanisms in high-risk industries. The article presents the results related to the development of a methodology for assessing the residual life of industrial equipment. An algorithm for assessing the residual life of power equipment is proposed, based on the comparison of the results of calculation of predicted values of the criteria of the residual life of industrial equipment with the normative values. The methodology uses probabilistic mathematical methods to predict the remaining service life and information collected during audits and equipment monitoring. Along with the classical methods, methods are presented based on the use of the entire potential of the modern element base of microprocessor technology and technologies for the use of artificial neural networks, machine learning, and «big data». Based on the application of probabilistic analysis, a methodology for monitoring the predicted residual life of power equipment has been proposed, for which an algorithm for solving diagnostic problems using neural networks has been developed.

© А. І. Важинський, С. Ф. Жуков, 2021

Keywords: diagnostics, artificial neural networks, efficiency, reliability, expert system, prediction, technical condition, identification, probabilistic mathematical methods, residual useful lifetime.

Вступ. В даний час сформувалося кілька методів обслуговування обладнання, серед яких можна виділити три основні: аварійне, обслуговування відповідно до регламенту і так зване предиктивне.

Перший вид – це обслуговування обладнання після виходу з ладу. Другий вид обслуговування – це обслуговування у межах планово-попереджувальних ремонтів, тобто обслуговування обладнання згідно з регламентом. У цьому випадку обслуговування здійснюється відповідно до рекомендацій заводу-виробника через певні проміжки часу. Роботи з обслуговування обладнання виробляються з певним періодом, що визначається регламентуючими документами.

Третій вид обслуговування, який і становить нині найбільший інтерес – предиктивне [1, 2] або обслуговування за фактичним технічним станом. При цьому виді обслуговування стан обладнання контролюється безперервно чи періодично. Програми технічного обслуговування складаються залежно від інформації, яка отримується від мікропроцесорних систем діагностування. Системи предиктивного обслуговування здатні прогнозувати стан системи на основі поточного стану обладнання та визначають необхідні заходи щодо технічного обслуговування [3]. Зниження частоти виходу з експлуатації устаткування, що є наслідком розширення впровадження систем діагностики, підвищує ефективність роботи енергетичного обладнання, підвищує якість готової продукції та знижує витрати на технічне обслуговування [4, 5].

Для господарського комплексу України, важливою частиною якого є металургійна промисловість, завдання визначення правильного методичного підходу до побудови сучасних діагностичних систем та максимально точного визначення ресурсу енергетичного обладнання як ніколи є актуальним у поточних умовах.

Актуальність. Електротехнічні комплекси металургійного виробництва забезпечують стійке енергопостачання відповідальних технологічних споживачів. Ефективна робота основного устаткування цехів значною мірою залежить від безаварійного функціонування електричного устаткування. Ситуація ускладнюється тією обставиною, що найчастіше максимальний проєктний термін експлуатації електрообладнання в металургійній промисловості, як і в інших галузях, наприклад, в енергетиці, підходить до граничних значень, а подекуди і перевищив їх [6]. У зв'язку з термінами вироблення встановленого ресурсу електрообладнання, що наближаються, стає актуальною проблема оцінки його технічного стану, прогнозування залишкового ресурсу і на цій основі продовження термінів його подальшої експлуатації.

Таким чином, на перше місце виходить проблема прогнозування залишкового ресурсу обладнання під час його експлуатації, досягнення граничних значень

технічних параметрів з обов'язковим збереженням необхідних значень надійності.

Існуючі методи вирішення проблеми. Досвід застосування систем діагностування на промислових об'єктах показує, що найбільший ефект досягається реалізацією методів визначення відмов та залишкового ресурсу обладнання на основі застосування спеціалізованих мікропроцесорних систем [7]. З метою узагальнення досвіду експлуатації таких систем доцільно їх систематизувати за такими ознаками [7]:

1. Системи діагностування комп'ютерних систем та їх компонентів.
2. Діагностування ефективності руху структурованих даних у розподілених комп'ютерних системах на основі технології побудови матричних моделей та епюр руху даних.
3. Системи вібродіагностики.
4. Системи діагностування об'єктів нафтогазового комплексу.
5. Системи контролю та управління технологічними процесами на атомних електростанціях.

6. Інші системи діагностування.

Важливою класифікаційною ознакою таких систем є використання певної інформаційної технології для реалізації алгоритмів та засобів діагностування, до яких належать:

1. Статистичний аналіз на основі обчислення математичного очікування, дисперсії та кореляційного аналізу.
2. Методи діагностики на основі Хеммінгових моделей.
3. Діагностика, що базується на основі застосування моделей у базисі Фур'є та інших числових базисів.
4. Діагностика з урахуванням ентропійних моделей.
5. Методи та засоби діагностики на основі нейронних мереж, а також відповідних експертних систем.
6. Діагностика з урахуванням кластерних моделей [7, 8].

Однак необхідно зазначити, що проблеми практики підвищення якості експлуатаційної надійності роботи електричного обладнання в гірничо-металургійній галузі в літературних джерелах загалом висвітлені недостатньо повно – ні в прикладній галузі, якщо не вважати деяких нормативних документів, що з'явилися в останні роки, ні в наукових дослідженнях.

Матеріали дослідження. Енергетичні установки, будучи складними та відповідальними технічними об'єктами, містять напружені вузли та агрегати, які при аварії можуть стати джерелом підвищеної небезпеки для виробництва та навколишнього середовища. Наразі, як зазначалося вище, близько 70 % енергоустановок вичерпали свій проєктний ресурс, але продовжують працювати. Виникає необхідність

впровадження у металургійній промисловості сучасних методів діагностики та систем контролю, що дозволяють прогнозувати можливість подальшої експлуатації обладнання, тобто розраховувати залишковий ресурс його [9].

Відмовою обладнання вважається порушення його працездатного стану. Якщо обладнання після відмови чи технічного огляду не підлягає відновленню, такий стан вважається граничним. Ознаки граничного стану устаткування, встановлені нормативно-технічною документацією, є критеріями граничного стану. Одним з таких є залишковий ресурс – запас можливого напрацювання.

При монотонно змінюваних діагностичних параметрах тієї чи іншої системи (тиск, температура, вібрація, витрата і т.д.) для прогнозування залишкового ресурсу обладнання може застосовуватися статистична методика на основі методу найменших квадратів [10]. Вибір методу прогнозування залишкового ресурсу залежить від умов експлуатації, характеру переважаючого процесу деградації (знос, корозія, втоми, повзучості та ін.), необхідної точності та достовірності прогнозу, а також від технічних можливостей реалізації методу. Критерієм вибору є критичність обладнання, вимоги до надійності системи експертної оцінки та обсяг даних. Оцінку працездатності за результатами діагностики здійснюють шляхом порівняння результатів із заздалегідь визначеними критеріями (нормативними значеннями). Виявлені дефекти відносять до допустимих або неприпустимих та приймають рішення щодо можливості подальшої експлуатації обладнання. Алгоритм представлено на рис. 1.

З усього вищесказаного можна дійти висновку, що найважливішим завданням при оперативному плануванні ремонтних робіт із єдиною метою мінімізації ризику виникнення аварійних ситуацій є завдання достовірного прогнозування показників контрольованого агрегату. Для цього може бути використаний метод прогнозування ресурсу ($r_0(t)$) обладнання з визначенням ймовірностей достовірності прогнозних значень [11]:

$$r_0(t) = r_B^{a_1}(t) r_M^{a_2}(t) r_\Gamma^{a_3}(t), \quad (1)$$

$$r_0(t) \in [0,1], \alpha_i \geq 0, \sum_i \alpha_i = 1, i = \overline{1,3}$$

де $r_B(t)$ – поточний ресурс обладнання, що оцінюється на основі аналізу даних інформаційних систем (програмований-логічний контролер, СКАДА, MES і т.д.);

$r_M(t)$ – призначений ресурс обладнання, який визначається на основі паспортних даних або даних, що надаються спеціалізованою організацією, що здійснює обстеження енергообладнання;

$r_\Gamma(t)$ – поточне значення коефіцієнта готовності аналізованого устаткування;

$\alpha_i (i = \overline{1,3})$ – ваги частинних складових $r_B(t)$, $r_M(t)$, $r_\Gamma(t)$.

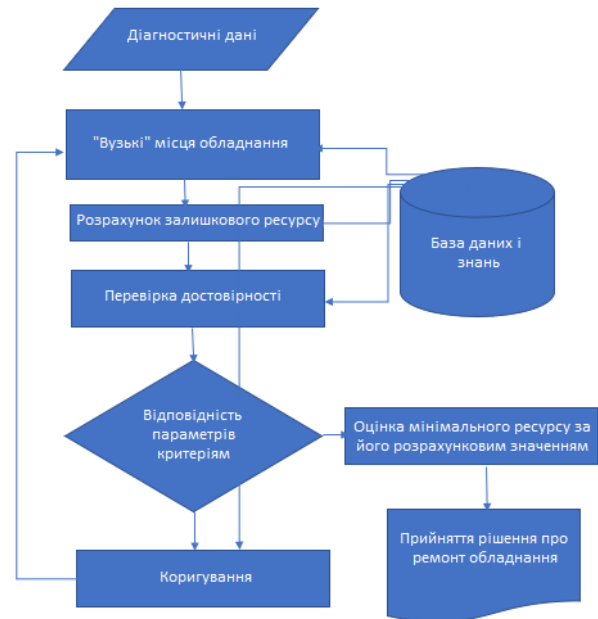


Рисунок 1 – Алгоритм прийняття рішення про залишковий ресурс обладнання

Таким чином, ресурс обладнання (1) відображає всі аварійні ситуації для комплексного об'єкта. Для розв'язання задач прогнозування стану контрольованого обладнання необхідно розуміти тенденцію зміни представницького діагностичного параметра, що характеризує поточний стан об'єкта контролю. У ролі такого показника може бути використаний ресурс обладнання, який визначається рівністю (1), який визначається на основі залежності від ресурсів складових частин комплексу (2):

$$r_0(t) = \prod_{i=1}^n r_i^{a_i}(t). \quad (2)$$

Як очевидно з визначення базової залежності основну роль розрахунку комплексного ресурсу контрольованого устаткування грають коефіцієнти ваги складових ресурсів (a_i). Так при одних і тих же значеннях складових ресурсів ($r_i(t)$) можуть виходити різні значення комплексного $r_0(t)$ показника. Тому ваги складових у складі комплексного ресурсу можуть визначитися як на основі експертної оцінки, так і на основі мінімізації помилки вирішення рівняння (2) одним з відомих способів. Наприклад, можна використати метод градієнтного спуску. Подібне визначення вагових коефіцієнтів сприяє виділенню тих складових ресурсів, які більшою мірою характеризують зміну поточного стану комплексу загалом.

Після розрахунку вагових коефіцієнтів складових ресурсів можна визначити ресурс енергетичної установки як комплексу. Підсумковим результатом визначення поточного ресурсу контрольованого об'єкта на момент часу стають два показники.

Перший – це оцінка критичного ресурсу установки, тобто виявлення «вузьких» місць. І другий – маючи однозначні показники комплексного ресурсу, можна оцінити динаміку зміни цієї інформації у часі. За підсумками побудови тенденції зміни можна спрогнозувати значення цього показника певний інтервал часу, тобто спрогнозувати стан контрольованого об'єкта. Це, у свою чергу, дозволить ефективно розпізнавати передаварійні ситуації на обладнанні.

У задачах діагностування та прогнозування нечітка нейронна мережа відіграє роль універсального апроксиматора функції від декількох змінних, реалізуючи нелінійну функцію (3):

$$Y = F(X), \quad (3)$$

де $\{X(t)\} = \{X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)\}$ – вектори вхідної інформації (поточні виміряні значення діагностичних параметрів), а Y – реалізація векторної функції кількох змінних. Постановка багатьох завдань діагностування та прогнозування технічного стану об'єкта може бути зведена саме до апроксимаційного уявлення.

Однією з простих моделей для встановлення діагностичної інформації можуть бути статичні моделі, що ув'язують критерії, що оцінюють стан об'єкта діагностування, його залишковий ресурс з відхиленнями вимірюваних параметрів у вигляді регресійної моделі дефектів (4):

$$\begin{aligned} \delta A &= W_{a1}X_1 + W_{a2}X_2 + \dots + W_{an}X_n \\ \delta B &= W_{b1}X_1 + W_{b2}X_2 + \dots + W_{bn}X_n, \end{aligned} \quad (4)$$

де $W_{a1}, W_{a2}, \dots, W_{an}, W_{b1}, W_{b2}, \dots, W_{bn}$ – вагові коефіцієнти (або коефіцієнти впливу).

У загальному вигляді алгоритм вирішення задач апроксимації та класифікації із застосуванням нейронних мереж, відповідно до [12], представлений на рис. 2.

Великою перевагою нейронних мереж є можливість використання так званої нечіткої інформації: експертні думки, судження «сильний», «слабкий», «достатній залишковий ресурс», «велика довговічність» тощо. Таким чином, на відміну від детермінованого підходу, ми можемо певним чином враховувати таку інформацію. У процесі навчання така гібридна мережа підлаштовує ваги вхідних нейронів і навчається найкращим чином відповідати зв'язку між вхідними і вихідними змінними. Іншими словами, створюється математична модель процесу чи явища. Ця модель найчастіше адекватна складній і громіздкій аналітичній моделі, створюється простіше і швидше. При зміні деяких констант (зовнішніх умов, показників і якостей об'єкта) вона легко перенавчається.

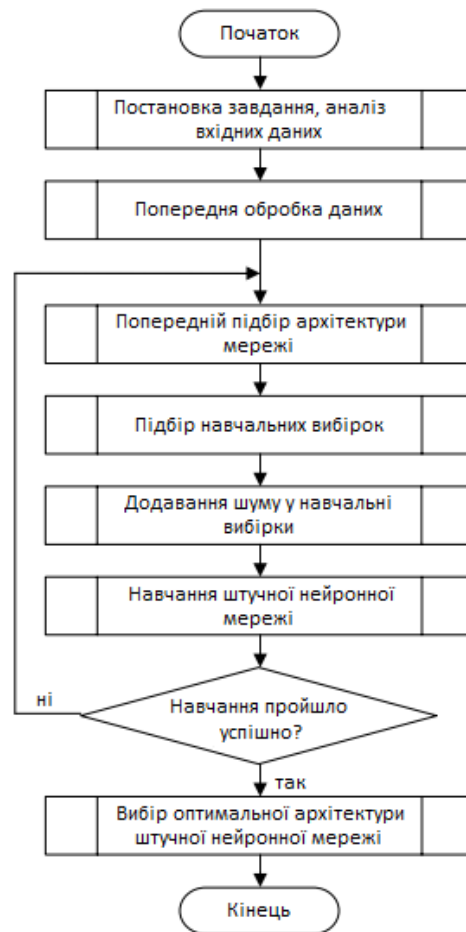


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму вирішення задач діагностики із застосуванням нейронних мереж

Висновки.

1. Застосування комплексного підходу до визначення залишкового ресурсу з використанням різних методів краще використання будь-якої однієї методики.

2. Запропоновано використання сучасного мікропроцесорного обладнання з можливістю розширення архітектури для реалізації перспективних досліджень у галузі теорії нейронних мереж та експертного аналізу

3. На основі застосування ймовірнісного аналізу отримано методику контролю прогнозного залишкового ресурсу енергетичного обладнання.

Список літератури

1. Rawi Z. Machinery Predictive Analytics. *SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition*. 2010. doi: 10.2118/128559-MS.
2. Stone P. Introducing Predictive Analytics: Opportunities. *Digital Energy conference and exhibition*. 2007. doi: 10.2118/106865-MS.
3. Vlasov A. I., Yudin A. V., Salmira M. A., Shakhnov V. A., Ussov K. A. Design Methods of Teaching the Development of Internet of Things Components with Considering Predictive Maintenance on the Basis of Mechatronic Devices. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12, no. 20. P. 9390–9396.
4. Власов А. И., Григорьев П. В., Жалнин В. П. Применение методов и средств радиочастотной идентификации в корпоративных информационных производственных системах. *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2017. Т. 1. С. 272–277.

5. Власов А. И., Григорьев П. В., Кривошеин А. И. Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей. *Надежность и качество сложных систем*. 2018. № 2 (22). С. 26–35. doi: 10.21685/2307-4205-2018-2-4.
6. Гиря М. П., Штабский Л. М., Бронников А. Г., Манузин А. А., Митюшева И. А. Вопросы продления сроков эксплуатации электротехнического оборудования АЭС. *Энергоснабжение. Энергетика. Энергоаудит*. 2007. № 9. С. 39–44.
7. Ширмовская Н. Г. Спецпроцессорное средство диагностики предаварийных и аварийных состояний объекта управления. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2014. № 5. С. 58–64.
8. Ширмовская Н. Г. Компьютеризированная система диагностирования квазистационарных объектов на основе кластерных моделей. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2013. № 1 (42). С. 155–159.
9. Казаков В. С., Слезко В. И., Кондратьева О. В. Диагностика эксплуатационных показателей эффективности работы энергетических установок. *Современные инновации в науке и технике: сб. ст. IV Междунар. науч.-практ. конф.* 2014. Т. 2. С. 201–205.
10. РД 26.260.004-91. *Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации*. Москва: Концерн Химнефтемаш, 1991. 96 с.
11. Казаринов Л. С., Шнайдер Д. А., Хасанов А. Р. Метод оценки текущего состояния контролируемого оборудования в задаче оперативного планирования ремонтно-профилактических работ. *Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2006. Вып. 4, № 14 (69). С. 84–87.
12. Осовский С. *Нейронные сети для обработки информации* / пер. с польского Рудинского И. Д. Москва: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
- radio frequency identification methods and tools in corporate production information systems]. *Trudy Mezhduнародного simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*. 2017, Vol. 1, pp. 272–277.
5. Vlasov A. I., Grigoryev P. V., Krivoshein A. I. Model' prediktivnogo obsluzhivaniya oborudovaniya s primeneniem besprovodnykh sensorynykh setey [Reliability and Quality of Complex Systems]. *Reliability and Quality of Complex Systems*. 2018, no. 2 (22), pp. 26–35. doi: 10.21685/2307-4205-2018-2-4.
6. Giryа M. P., Shtabskiy L. M., Bronnikov A. G., Manuzin A. A., Mityusheva I. A. Voprosy prodleniya srokov ekspluatatsii elektrotekhnicheskogo oborudovaniya AES [Issues of extending the service life of nuclear power plant electrical equipment]. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*. 2007, no. 9, pp. 39–44.
7. Shyrmovskaya N. G. Spetsprotsessornoe sredstvo diagnostiki predavariynykh i avariynykh sostoyaniy ob"ekta upravleniya [Specialprocessor means of diagnostics of precritical and critical conditions of object of management]. *Bulletin of Brest State Technical University*. 2014, no. 5, pp. 58–64.
8. Shirmovskaya N. G. Komp'yuterizirovannaya sistema diagnostirovaniya kvazistatsionarnykh ob"ektov na osnove klasternykh modeley [Computerised diagnostic system for quasi-stationary objects based on cluster models]. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2013, no. 1 (42), pp. 155–159.
9. Kazakov V. S., Slezko V. I., Kondrat'eva O. V. Diagnostika ekspluatatsionnykh pokazateley effektivnosti raboty energeticheskikh ustanovok [Diagnosis of the operational performance of power plants]. *Sovremennye innovatsii v nauke i tekhnike: sb. st. IV Mezhduнар. науч.-практ. конф.* 2014, Vol. 2, pp. 201–205.
10. RD 26.260.004-91. *Metodicheskie ukazaniya. Prognozirovanie ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmeneniyu parametrov ego tekhnicheskogo sostoyaniya pri ekspluatatsii* [Guiding Document 26.260.004-91. Methodological guidelines. Prediction of residual life of equipment according to changes in parameters of its technical condition during operation]. Moscow, Kontsern Khimneftemash Publ., 1991. 96 p.
11. Kazarinov L. S., Shnayder D. A., Khasanov A. R. Metod otsenki tekushchego sostoyaniya kontroliruemogo oborudovaniya v zadache operativnogo planirovaniya remonto-profilakticheskikh rabot [Method for assessing the current state of monitored equipment in the task of operational planning of repair and maintenance work]. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technology, Automatic Control, Radio Electronics"*. 2006, Vol. 4, no. 14 (69), pp. 84–87.
12. Osovski S. *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*. Warszawa, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2000. (Russ. ed.: Osovskiy S. *Neyronnye seti dlya obrabotki informatsii*. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2002. 344 s.)

References (transliterated)

Надійшла (received) 12.11.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Важинський Антон Іванович (Важинский Антон Иванович, Anton Ivanovich Vazhinskiy) – кандидат технічних наук, начальник управління ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», м. Кривий Ріг, Україна; e-mail: v.anton0304@gmail.com.

Жуков Станіслав Федорович (Жуков Станислав Федорович, Stanislav Fedorovich Zhukov) – доктор технічних наук, професор, генеральний директор ННВЦТУ «Квантум», м. Маріуполь, Україна; e-mail: sfg8800@gmail.com.